

# 科学技術動向

2002

12

No.21

## 科学技術トピックス

### ▶ ライフサイエンス分野

- ①米国カリフォルニア州がヒトクローン胚の作成を容認
- ②鱗翅目昆虫を対象としたゲノム研究の国際的な動向が報告される  
～第一回国際鱗翅目昆虫ゲノムワークショップより～
- ③約6万クローンのマウス完全長 cDNA の塩基配列  
および遺伝子機能情報が公開される

### ▶ 情報通信分野

- ①超伝導量子コンピュータの新方式を理研が提唱

### ▶ 環境分野

- ①オゾン層保護と地球温暖化防止に向け  
HFC 排出抑制の自主的使用原則が策定される

### ▶ ナノテク・材料分野

- ①最も軽い金属のリチウムが超伝導体になることが  
世界で初めて実証された

### ▶ エネルギー分野

- ①次世代型軽水炉の研究開発 —第13回環太平洋原子力国際会議から—

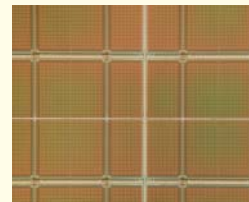
### ▶ 製造技術分野

- ①環境にやさしいフッ素化芳香族化合物の新しい製造法

**特集 1** 若手研究者の活性化を促進する  
競争的研究資金（研究グラント）の  
整備の必要性

**特集 2** ドラッグデリバリーシステム（DDS）の  
研究開発動向

**特集 3** 光触媒利用技術の現状と展望





## 科学技術トピックス

### ライフサイエンス分野

5

#### ①米国カリフォルニア州がヒトクローン胚の作成を容認

2002年9月22日、米国カリフォルニア州のGray Davis知事は、ヒト体細胞からの核移植を含むあらゆるヒト生体材料からのヒト胚性幹細胞（ヒトES細胞）等の樹立及び利用に関する研究を認める州法案にサインした。この法案により核移植によるヒトクローン胚の作成も認められることになる。米国では、ヒトクローン胚の作成及びヒトクローン個体産生を禁止する法案が下院を通過し、現在上院で審議中である。今回のカリフォルニア州の決定は、核移植によるクローン胚の作成を認めた点で米国では最初のものであり、今後の成り行きが注目される。

#### ②鱗翅目昆虫を対象としたゲノム研究の国際的な動向が報告される

##### ～第一回国際鱗翅目昆虫ゲノムワークショップより～

日本でのカイコを利用した遺伝学研究の蓄積と最近のゲノムプロジェクトおよびトランスジェニックカイコ作出技術の進展は国内外の研究者により高く評価されている。アメリカ、フランス、中国などにおいてもカイコを含む鱗翅目昆虫のゲノム研究が進められてきている。鱗翅目昆虫ゲノム研究は、基礎生物学的興味に留まらず、害虫防除と昆虫機能利用などの応用的観点からも重要性が高く、しかも歴史あるカイコ研究のおかげで日本が主役を演じられる分野だけに、国際協力による今後の発展が大いに期待される。

#### ③約6万クロンのマウス完全長cDNAの塩基配列

##### および遺伝子機能情報が公開される

マウスゲノムの塩基配列決定を行うマウスゲノムシーケンスコンソーシアム（MGSC）と、タンパク質合成のための設計情報をもつマウス完全長cDNAに遺伝子機能情報の注釈付けを行う国際FANTOMコンソーシアムとの連携により、60,770クロンセットの完全長cDNAの塩基配列および遺伝子機能情報が明らかになった。ゲノム情報と転写産物の全容が併せて明らかにされたのは、今回のマウスが初めてである。これら一連の成果は2002年12月5日号のNature誌にマウス特集号として掲載された。

### 情報通信分野

7

#### ①超伝導量子コンピュータの新方式を理研が提唱

理化学研究所の研究グループは超伝導素子を使った新しい量子ビットの集積回路方式を提唱した。量子コンピュータは、現在のスーパーコンピュータでは計算できない問題が計算可能となるとして注目されている。その基本素子である量子ビットについて種々の方式が提案されているが、実用的な量子コンピュータに必要な、多数の量子ビットを集積回路として実現したものはない。理研の新回路方式では量子ビットを数百個並べることが可能になる。従来提案されていた超伝導量子ビットの回路方式では、実用的な計算ができる多数の量子ビットを接続した集積回路を実現することは難しかった。今回の発表は理論的提案のみであり、今後、実際の回路による実証が期待される。

## 環境分野

8

### ① オゾン層保護と地球温暖化防止に向け HFC排出抑制の自主的使用原則が策定される

日本、米国、国連環境計画等からハイドロフルオロカーボン（HFC）の排出抑制に関する自主的ルール策定が発表された。HFCは、オゾン破壊係数がゼロ、熱触媒としてエネルギー効率に優れている反面、地球温暖化効果係数が大きく、京都議定書で排出抑制の対象物質となっているが、現在、HFCを含むフロン代替物質の大気中濃度は増加傾向にある。今回の使用原則の策定により、今後は製造工程や使用後におけるHFCの回収・リサイクル・再生・破壊に関する取り組みが進むと期待される。

## ナノテク・材料分野

8

### ① 最も軽い金属のリチウムが超伝導体になることが世界で初めて実証された

大阪大学基礎工学研究科の清水助手らは、理論的には超伝導体になりにくいと言われてきた最も軽い金属である金属リチウム（Li）が、30GPa（大気圧の30万倍）以上の高圧下では超伝導体になることを世界で初めて実証した。今後、より高い圧力をかけることによって超伝導転移温度がどこまで上昇するのか興味深い。また、この研究成果は、究極の高温超伝導体と言われている固体の金属水素に関しても重要な知見をもたらすものと考えられている。

## エネルギー分野

9

### ① 次世代型軽水炉の研究開発 ―第13回環太平洋原子力国際会議から―

次世代型原子炉についての研究開発が世界的に活発化している。10月21～25日に、中国の深圳<sup>しんせん</sup>で開催された第13回環太平洋原子力会議（PBNC2002）では、わが国の研究グループから、減速材である水の体積を核燃料の半分以下と小さくした低減速軽水炉と、冷却水を沸騰現象がなくなる臨界点以上に加圧して用いる貫流直接サイクル型超臨界圧軽水冷却炉といった次世代型軽水炉が報告された。わが国の研究開発は世界的にトップを走っており、今後の取り組みが期待される。

## 製造技術分野

9

### ① 環境にやさしいフッ素化芳香族化合物の新しい製造法

フッ素化芳香族化合物は医薬や農薬の中間化合物として大量に製造されている重要な化合物である。しかし、従来の製造法は多段階のプロセスで合成し、多量の廃棄物を副生するためコストも高く、環境にやさしいとはいえない。このほど、デュポン社は、廃棄物を少なくし主たる副生物が水という、環境にやさしく、製造コストも安価な新しい製造法を開発したと発表した。これは、他のフッ素化化合物にも適用できるとされ、環境にやさしいプロセスとして今後の進展が期待される。



## 特集—1

# 若手研究者の活性化を促進する 競争的研究資金(研究グラント)の 整備の必要性

 — 11

第2期科学技術基本計画において「若手研究者の自立性の向上」に対する施策の一つとして、「若手研究者を対象とした研究費を重点的に拡充する」と提言された。これを受けて文部科学省を始め、各省庁による若手研究者への研究グラントが拡充されている。我が国の若手研究者対象の研究グラントの歴史は新しく、今後どのような内容の研究グラントの整備が必要であるかは、日本の若手研究者の現状を理解した上でなされなくてはならない。本稿では、研究グラントシステムの完成度の高い米国の若手研究者対象の研究グラントの内容を検証し、日本の若手研究者対象の研究グラントとの比較を行い、若手研究グラントに盛り込むべき内容を考える。

若手研究者に対する研究支援の重要性は、ノーベル賞受賞者の受賞対象となった研究業績を上げた年齢が、「30歳から44歳」という博士号を取得してから約10年～15年以内の若手研究者の年齢層に集中していることで示される。この時期の若手の研究者に、独立した立場で自らの柔軟な発想を試す機会を与えるのが、研究グラントである。

米国では国立衛生院(NIH)が中心になり、独立した立場で研究を開始して5年以内の研究者を発展途中の若手研究者と位置づけ、様々な段階に応じた研究グラント支援をおこなっている。一方、日本の研究グラントには米国型の「研究者育成のグラント」という概念はない。また、米国における研究グラントは米国の研究者が研究キャリアを重ねていく上で必要不可欠なものであり、日本の従来の研究グラントのような報奨金的な色彩が強いものとは異なる。

平成13年度に文部科学省科学技術・学術政策局により実施された産官学の研究者を対象にしたアンケート結果から、日本の若手研究者(30歳以上35歳未満)の研究グラントに向かう姿勢は所属研究機関により異なり、それぞれの研究機関で若手研究者が直面している問題も異なることが示された。

研究グラントの獲得競争が盛んな米国が様々な科学技術分野でトップを走っていることから、若手研究者の研究グラント獲得に対する意欲を向上させたり維持させたりすることは、我が国の科学技術研究の発展に重要であると考えられる。そのための施策として、若手研究者対象の研究グラントに「多様性」を盛り込むことを提言する。

## 特集—2

# ドラッグデリバリーシステム(DDS)の 研究開発動向

 — 25

近年、薬物の過剰投与および副作用を抑制して、より安全に、効果的に薬物投与を行う手段として、“必要最小限の薬物を、必要な場所に、必要なときに供給する”ドラッグデリバリーシステム(Drug Delivery System, DDS)の研究が活発に行われている。DDSには薬物を体内でゆっくり溶かすことを目的とする方法と血流に乗せて目的とする患部まで薬物を送る方法がある。これらの方法の実用化には、薬物の改良だけでは困難であり、薬物を担持する高分子材料あるいは無機材料などマトリックス材料の開発が必要となる。

さらに、DDSは生体メカニズムの理解が深まり、材料設計技術が高まった結果、新しい治療法である遺伝子治療、再生医療およびゲノム製剤を利用した治療においても、より効果的に、より安全に治療する手法として期待されている。

がんおよび再生医療などを対象としたDDSについては、薬物を担持する高分子ミセル（集合体）あるいはリポソーム（脂質膜でできた小胞）などを利用する研究が著しく発展し、数々の臨床試験が行われている。この領域における我が国の研究開発の水準は欧米に比べても高い。また、消化器系のDDSとして実用可能なMEMS（微小機械システム）が開発されている。このように現在DDSの研究開発は大きく実を結ぼうとしている。さらに、DDSは2002年度の厚生労働省の科学技術政策において「先端科学技術の開発と応用」（ナノメディシンプロジェクト）で取り上げられるなど、研究開発において大きく飛躍する時期を迎えている。

DDSの研究開発は、学際領域であるため幅広い分野の連携が必要である。このような分野の連携は、一企業、一大学、一研究所では達成が期待できない。したがって、できるだけ早い時期に連携の中心となる組織を国の強い主導で構築し、優れた研究者のもとで、環境・体制を整えDDSの研究開発を産学官の共同で進め、日本の高い技術競争力レベルを維持・発展させることが必要である。

### 特集—3

## 光触媒利用技術の現状と展望 — 35

光触媒は、光を吸収して高いエネルギー状態となり、そのエネルギーを反応物質に与えて化学反応を起こす触媒である。バンドギャップ以上のエネルギーを持つ光子を利用するため、熱エネルギーを利用した反応では難しい、はるかに励起された状態の反応促進効果を持っている。

この特長を活かして、水や有害物質の分解が可能である。この現象を利用した本田・藤島効果が、酸化チタンに発現することが1970年代に確認されて以来、クリーンなエネルギー源、あるいは有害物質分解反応が着目され盛んに研究がなされた。

90年代に入り、防曇・防汚あるいは抗菌的な作用を利用した材料が数多く提案されるにおよび、実用化が本格化してきた。一方、これらの研究開発の進展に伴い量子効率の低い点、光源の問題、可視光に鈍感な点等克服すべき研究課題が顕在化してきた。量子効率の向上あるいは可視光応答の材料を模索が試みられているが、いずれの場合にも、酸化チタンをベースとした材料に限定されることが多い。光源については、青色発光ダイオードが実用化されることに伴い、これを利用した機器が数多く提案されている。この利用のためにも可視光応答が求められているところであるが、窒素や遷移金属を添加することにより解決が図られてきた。しかしながら、量子効率についての問題は未だに残されたものとなっている。

これらをブレイクスルーし、さらに光触媒を利用した産業やマーケットを拡大するには、触媒機構の解明や酸化チタンを凌駕する材料の探索が必要である。さらに、標準化の遅れによる商品性能のばらつきも指摘されている。酸化チタン粉自体の製法が比較的簡単であるため、容易に取りかかれる分野であるが、一定の水準を保った材料を提供するには、多くの特許やノウハウ等が産業基盤として必要である。様々な用途に沿った標準化がなされることでこれらの基盤の発展が期待できる。

# 科学技術 トピックス

以下は科学技術専門家ネットワークにおける専門調査員の投稿（12月号は2002年11月2日より2002年11月29日まで）を中心に「科学技術トピックス」としてまとめたものです。センターにおいて、関連する複数の投稿をまとめ、また必要な情報を付加する等独自に編集するため、原則として投稿者の氏名は掲載いたしません。ただし、投稿をそのまま掲載する場合は、投稿者のご了解を得て、記名により掲載しています。

## ライフサイエンス分野

### ①米国カリフォルニア州がヒトクローン胚の作成を容認

2002年9月22日、米国カリフォルニア州のGray Davis知事は、ヒト体細胞からの核移植を含むあらゆるヒト生体材料からのヒト胚性幹細胞（ヒトES細胞）等の樹立及び利用に関する研究を認める州法案にサインした（Science（2002）Vol. 297, Page 2185）。この法案により核移植によるヒトクローン胚<sup>①</sup>の作成も認められることになる。州知事はこの法案と同時にヒトクローン個体産生の一時的禁止を恒久的な禁止とする法案にサインした。

米国では、ブッシュ政権がヒトクローン胚の作成を禁止すべきとの方針を明確にしており、今年4月の大統領のスピーチにおいても、ヒトクローン個体作成とヒトクローン胚の研究を禁止すべきであると述べている。また、2001年7月31日にヒトクローン胚の作成及びヒトクローン個体産生を禁止する法案が下院を通過し、現在上院で審議中である。今回のカリフォルニア州の決定は、核移植によるヒトクローン胚の作成を認めた点で米国では最初のものであ

#### ①ヒトクローン胚

ヒトの体細胞の核を、除核した未受精卵に注入することにより作成した胚。ヒトのクローン胚から必要な臓器や細胞を作成することができれば、新しい医療技術の開発に結びつくと期待されている。

り、今後の成り行きが注目される。

現在、ヒトクローン胚の作成については、英国が条件付で認めている以外は、フランス、ドイツとも認めていない。日本では、当面ヒトクローン胚の作成を認めないこととしており、2000年11月に成立したクローン技術規制法においてヒトクローン胚の胎内への移植を禁止している。

この問題については、研究及び研究資源の国際的なアンバランスを生む可能性があり、将来、倫理問題を含め国際的な調整が必要となるかもしれない。

（味の素㈱ 都河 龍一郎 氏）

### ②鱗翅目昆虫を対象としたゲノム研究の国際的な動向が報告される

～第一回国際鱗翅目昆虫ゲノムワークショップより～

独立行政法人農業生物資源研究所(動物生命研COE)/生研機構/未来開拓研究等の共催による第一回国際鱗翅目昆虫ゲノムワークシ

ョップがつくばの研究交流センターにおいて2002年9月30日～10月3日に開催された。

講演者は日本（17名）、アメリカ合衆国（9名）、フランス（4名）、中国（3名）、インドとオーストラリア（各2名）、韓国、タイ、ギリシャ、カナダ及びチェコ（各1名）の11か国42名であった。全体的な印象としては、日本でのカイコを利用した遺伝学研究の蓄積と最近のゲノムプロジェクトおよびトランスジェニックカイコ作出技術の進展は国内外の研究者により高く評価されており、その成果を各国の鱗翅目昆虫研究に応用していこうという姿勢が感じられた。

また、フランスでは、カイコゲノム研究と連携して害虫の一種であるヤガ科昆虫の統合ゲノムデータベース構築に着手している。一方、イネゲノムでその力量を示した中国は、未公開ながらすでに膨大なカイコのEST<sup>②</sup>データベースを構築していることを明らかにした。カナダやオーストラリアでの鱗翅目害虫のESTデータベース

作りの進展が報告された。

アメリカ、フランスおよび日本からは、形質転換昆虫作製技術の開発や改良についても新しい成果が披露された。特に、現在主流のバキュロウイルスの代りにトランスジェニックカイコを使って絹糸と一緒に生理活性タンパク質（ネコインターフェロン）生産をおこなうという、東レと農業生物資源研究所との共同の取り組みは画期的であった。

鱗翅目昆虫ゲノム研究は、基礎生物学的興味に留まらず、害虫防除と昆虫機能利用などの応用的観点からも重要性が高く、しかも歴史あるカイコ研究のおかげで日本が主役を演じられる分野だけに、国際協力による今後の発展が大いに期待される。

（三重大学工学部 小林 淳 氏）

### ③約6万クロンのマウス完全長cDNAの塩基配列および遺伝子機能情報が公開される

マウスは、ヒトとほとんど同じ遺伝子を持つことや遺伝学的実験が行いやすいことなどから、ヒトのモデル動物として医学・生物学的研究の中心となっている。マウスのゲノムプロジェクトはヒトゲノムプロジェクトと並行して進められており、世界的にも重要課題とされている。今回、マウスゲノムの塩基配列決定を行う国際組織であるマウスゲノムシーケンスコンソーシアム（MGSC）の取組により、マウスのゲノムシーケンスドラフトが完成された。

またゲノム研究においては、DNAから転写されたmRNAを鋳型に作られた完全長cDNA<sup>③</sup>（タンパク質合成のための設計情報のみをもつDNA）の解析が大変重要である。これまでに理化学研究所では、全てのマウス遺伝子（完全長cDNA）を取り出し、その塩

## 用語説明

### ②EST（expressed sequence tag 発現配列タグ）

メッセンジャーRNAの相補的（complementary）DNA（cDNA）の部分塩基配列をESTと呼ぶ。cDNAは細胞内で発現された遺伝子の塩基配列を表し、ESTは遺伝子の塩基配列に到達する手段のひとつと考えられている。

### ③完全長cDNA

ゲノムDNAの中から不要な配列を除き、タンパク質をコードする配列のみに整理された遺伝情報物質であるmRNAを鋳型にして作られたDNAのこと。完全長cDNAは、断片cDNAと異なり、タンパク質を合成するための設計情報を全て有しているため、タンパク質を合成することができる。

### ④トランスクリプトーム

生物のゲノムから転写された遺伝子全体を指す用語。トランスクリプトームの解析を行うことにより、それぞれの遺伝子が転写されている組織や、発生段階などの情報が得られ、ゲノムの塩基配列から予測されるもののみではなく、コンピューターでは予測できない遺伝子の存在も実証することができる。

基配列情報などを体系的に整理するマウスエンサイクロペディア計画を推進し、完全長cDNAデータベースを構築してきている。さらにこの完全長cDNAに遺伝子機能情報の注釈をつける（アノテーション）国際FANTOMコンソーシアムが理研主導のもと結成されており、これまでに2度の国際会議を開くなど活発な活動が行われてきた。

今回、MGSCと国際FANTOMコンソーシアムの連携により、マウスゲノム上に完全長cDNAをマップすることで、約6万クロンのゲノム情報と転写産物の全容が併せて明らかにされた。このようにゲノムとトランスクリプトーム<sup>④</sup>双方の同時解読・解析がなされたのは、今回のマウスが初めてである。これら一連の成果は、2002年12月5日号のNature誌にマウス特集号として掲載された。

今回の成果は、(1)マウス完全長cDNAにおいて60,770クロンセット（FANTOM2クロンセット）の塩基配列および機能解析を行い機能アノテーションを付与したこと、(2)FANTOM2クロンセットの中には約33,000種類の遺伝子（現在までに収集された全遺伝子の約9割に相当）が含まれており、このうち約16,000種類は今回新たに発見された遺伝子である

こと、(3)マウスのゲノムとトランスクリプトームを一体で解析することにより、ゲノム解析だけでは遺伝子として認知されていない部分が、実際には遺伝子として転写されていることを初めて科学的に実証したことなどの点で非常に重要である（The FANTOM Consortium and The RIKEN Genome Exploration Research Group Phase I & II Team, Analysis of the mouse transcriptome based on functional annotation of 60,770 full-length cDNA, Nature, 420, 563-573, 2002）。

今回得られた成果は、ヒトやマウスをはじめとする様々な生物についての基礎研究および医療・創薬などの応用研究のためのプラットフォームとなることが期待される。なおFANTOM2の情報は、2002年12月5日から理研内のホームページおよび日本DNAデータバンク（DDBJ）により公開されたほか、国内外の分譲を希望する科学研究者の利用に供するため、頒布体制を整えていく予定としている。また、FANTOM2クロンセットは、「RIKEN-FANTOM2クロンセット」の名称で頒布する予定である。

（理化学研究所 林崎 良英 氏）

## 情報通信分野

### ①超伝導量子コンピュータの新方式を理研が提唱

近年注目されている量子コンピュータの実現を目指して、超伝導素子を使った数百個の「量子ビット」の集積を可能にする回路方式を、理化学研究所フロンティア研究システムの単量子操作研究グループのFranco Nori（ミシガン大学終身教授兼務）、蔡 兆申（NEC基礎研究所主席研究員兼務）らが考案し、Physical Review Letters 11月4日号（2002）に発表した。

量子コンピュータは、現在のコンピュータと異なり各ビットが量子力学に基づいて動作するコンピュータで、現在のスーパーコンピュータでは現実的な時間内で解けないある種の問題（大きな数の素因数分解等）を数秒で計算可能になるとして注目されている。

量子コンピュータの基本素子である量子ビットの実現方法については、種々の方式が提案されており、まだ本命が決定しているわけではない。コヒーレンス（量子ビット間の量子力学的相互作用）を長時間保ち、多ビットへの展開が容易な方法を研究している段階である。

超伝導を用いた量子ビットは数十 $\mu\text{m}$ 程度の長距離にわたって、コヒーレンスを実現することが出来る。このいわゆる巨視的量子効果は他の量子素子にはない超伝導の大きな利点であり、多くの素子を組み合わせて量子コンピュータを実現することが可能であると考えられている。

超伝導量子ビットには、大きく

分けて、電子箱<sup>①</sup>に閉じこめた電荷を使う電荷量子ビットと、SQUID<sup>②</sup>に閉じこめた磁束を使う磁束量子ビットがある。今回理研の研究グループが提唱したのは電荷量子ビットである。従来提案されていた電荷量子ビットを使った集積回路方式では、多ビット化が幾何学的に困難であったり、任意の量子ビットを制御するのが困難である等の問題で、実用的な量子コンピュータに必要な、100量子ビット単位の集積度のスケールアップの目途が立っていなかった。

提案された方式は、次のようなものである。まず、量子ビットとなる量子箱の両側に2個の超伝導ループをつなぐ。超伝導ループはそれぞれ2カ所のジョセフソン接合で分断されており、全体は量子箱につながった2個の直流超伝導量子干渉器（DC-SQUID）が形成される形となる。量子箱に接近し

て制御用のゲートを設置されている。

複数の量子ビットは二つのSQUIDを介して並列に超伝導配線で接続され、さらに全量子ビットに共有されるインダクタンス（コイル）が並列に接続される。これにより量子ビット間がDC-SQUIDを通じて結合できるようにした。量子ビットの制御は、ゲート電圧とSQUIDに加えられる磁場、共有コイルに加えられる磁場によって制御される。この方式では、隣り合ってなくても量子ビット間の相互作用を制御できるようになるほか、量子計算の基本的なゲート操作である制御NOTゲート操作、制御位相ゲート操作<sup>③</sup>をいずれも1回の操作でできるようになる。

今回の発表は回路の理論的な検証が終わった段階であるが、今後実験的に実証されることを期待したい。

## 用語説明

#### ①電子箱

微小な金属や半導体の孤立パターンに外部から電子を出し入れする時、大きな静電エネルギーの変化が発生する。そのために、電子箱と呼ばれるこのような構造へ電子を出し入れする際のエネルギーは、移動する電子の数に対応する「電荷数状態」として量子化（原子中の電子のようにとびとびの値を取る）される。この状態では電子数状態のエネルギー単位と周囲のエネルギー単位が一致しない限り電子は電子箱の中に閉じこめられる。電子箱は単一電子デバイス、ナノエレクトロニクス素子や量子コンピュータの基本素子として期待される。なお、超伝導体の場合、電子は単一ではなくクーパーペアと呼ばれる2個一組で電子箱に閉じこめられる。

#### ②SQUID（超伝導量子干渉素子）

1つあるいは2つのジョセフソン接合により超伝導ループを分断した磁気デバイス。このループに加えられる最大超伝導電流値は、ループの中に閉じこめられた磁束により変化する。非常に微弱な磁気に応答する特性を使い、超高感度磁気センサとして用いられる。

#### ③制御NOTゲート、制御位相ゲート

いずれも量子コンピュータにおける基本論理ゲートであり、1ビットの制御と組み合わせることで、すべての論理操作が可能になる。

## 環境分野

### ① オゾン層保護と地球温暖化防止に向けHFC排出抑制の自主的使用原則が策定される

11月29日、日本（経済産業省）と米国（EPA）、国連環境計画（UNEP）および日・米・欧・加・豪・中などの25の事業者団体は共同で、ハイドロフルオロカーボン（HFC）の排出抑制のための自主的使用原則「RESPONSIBLE USE PRINCIPLES FOR HFCs」を策定したと発表した。

現在、先進諸国を主とした世界各国では、オゾン層保護の観点から、モントリオール議定書に基づきフロン等の段階的削減・全廃を進めている。HFCは、オゾン破壊係数はゼロで、エネルギー効率が優れているためフロンの代替物質として、家電製品や発泡断熱材、消火剤など幅広い用途で使用され

ている。IPCC第3次レポートをはじめ世界各国において、HFCはオゾン層破壊物質の代替物質として不可欠とされており、また、ハイドロクロロフルオロカーボン（HCFC）<sup>（注1）</sup>の削減にも必要とされている。しかしながら、HFCなどフロン代替物質は、地球温暖化効果係数が大きく、京都議定書では排出抑制の対象物質となっている。

今年8月、環境省は、モントリオール議定書（オゾン層を破壊する物質に関する議定書）に基づき先進国では生産が全廃されたフロンの大気中濃度が、北海道の観測点（北半球中緯度の平均的な状況を代表）で、横ばい若しくは減少傾向を示しているものの、同議定書で生産の総量規制がされていないHFCなどの代替フロンの大気中濃度は、増加傾向にあることが判明したと発表した。

今回策定された使用原則では、(1)必要な用途を選んでHFCを使

用すること、(2)製造から使用、廃棄にわたる各段階でHFCの排出を最小化し、エネルギー効率を最大化していくこと、(3)HFCの回収、再利用、破壊を促進すること、(4)実用可能な代替物質を検討すること、などが盛り込まれた。今後、本使用原則に参加した行政機関及び事業者団体は、これを履行することにより、HFCの排出抑制に積極的に取り組んでいくこととなる。

今回策定された使用原則によって、今後、製造工程や使用後におけるHFCの回収・リサイクル・再生・破壊に関する取り組みへの世界的な進展が期待される。

（注1）オゾン破壊係数がゼロではない代替フロンの一種。モントリオール議定書ではオゾン層破壊物質として規制対象とされ、2004年に生産の総量規制、2020年に生産全廃となっている。

## ナノテク・材料分野

### ① 最も軽い金属のリチウムが超伝導体になることが世界で初めて実証された

超伝導材料は、液体ヘリウム温度（4 K：－269℃）や液体窒素（77 K：－196℃）で冷却して用いるが、圧力をかけると超伝導転移温度（超伝導体に変化する温度）は上昇することが知られている。大阪大学基礎工学研究科の清水助手らは、これまでも酸素・ヨウ素・カルシウム・鉄などの単体の元素が、高圧下では超伝導体に転移することを実験的に証明してき

た。このほど、理論的には超伝導体になりやすいと言われてきた金属リチウム（Li）が、高圧下では金属としては最も高い温度で超伝導体になることを世界で初めて実証した（Nature, vol.419, p.597 (2002)）。

清水助手らは、ダイヤモンドアンビルセルという小型の金属容器に測定端子の付いた金属試料を詰め、ガス駆動式で等方的に圧力を加えながら冷却して電気測定を行っている。リチウムはたいへん高い反応性を持つため、すぐに酸化などの反応を起こしてしまう。この点を工夫して金属状態を保ったまま金属リチウムに高い圧力をかけたところ、30 GPa（大気圧の

30万倍）以上で超伝導体となり、現時点で実験可能な最高圧力である48 GPa（大気圧の48万倍）では超伝導転移温度が20 K（－253℃）まで上昇することを見出した。

従来から超伝導体の基本的な理論と見なされているBCS理論によれば、原子番号が小さく軽い元素ほど高い超伝導転移温度が予想されており、清水助手らの一連の研究成果はその予想を証明している。今後、実験的にさらに高い圧力をかけることが可能になれば、超伝導転移温度がどこまで上昇するのか興味深い。

また、今回の金属リチウムの測定結果は、理論的には超伝導体に

なりにくいと言われてきたアルカリ金属も超伝導体になることを証明した初めてのケースとしても高く評価される。リチウムは、究極の高温超伝導体ではないかと考えられている金属水素に構造が最も近い金属である。したがって、金

属リチウムの高压下での構造や電子状態は、まだ得られていない固体の金属水素に関しても重要な知見をもたらしてくれるものと期待される。清水助手らの高压低温下における超伝導物質研究は、これまでは世界的に見てもほぼ独走状

態であったが、上記論文発表の約1ヶ月後には米国から追試データの発表があり (Science, vol.298, p.1213 (2002))、今後はこの分野の競争も激化することを予感させる。

## エネルギー分野

### ①次世代型軽水炉の研究開発 —第13回環太平洋原子力国際会議から—

今日、次世代型原子力システムについての研究開発が世界的に活発化している。7月にリオデジャネイロで開催された第4世代原子力システムに関する国際フォーラム (GIF) では、2030年頃までの実用化を目標とする第4世代原子力システム候補 (6概念グループ) と、より早期に導入される可能性がある短期導入候補 (5概念グループ) がリストアップされた。この中には、高速炉、小型炉、液体金属炉、ガス炉、溶融塩炉、次世代型軽水炉など多様な炉型が含まれている。

10月21～25日、第13回環太平洋原子力会議 (PBNC2002) が中国の深圳で開催され、次世代型原子炉関連で30件超の研究発表がなされた。

本稿では、わが国の研究グルー

プによる次世代型軽水炉についての発表を紹介する。このタイプの原子炉は、既存の軽水炉の研究開発や運転で得た知識や経験を最大限に活用することができ、わが国の研究水準は世界トップクラスである。

日本原子力研究所・日立・日本原子力発電の共同研究グループは、短期導入候補の一つである低減速軽水炉の設計仕様と基本特性を報告した。この原子炉は、減速材である水の体積が核燃料の半分以上と小さく、炉内中性子のエネルギーが高くなっている。このため、ウランからプルトニウムへの転換割合が高くなり、増殖を含めたウラン資源の有効利用が可能となる。また、MOX燃料を使用するため、将来のプルトニウムの需給に応じた柔軟な運転も可能である。現在、2020年代の実用化を目指し、原研を中心に本炉型の成立性を確認するための熱流動試験や材料試験を実施している。

一方、東京大学の岡芳明教授の

研究グループは、第4世代原子力システム候補の一つと位置付けられている貫流直接サイクル型超臨界圧軽水冷却炉について報告した。この原子炉は、冷却水を沸騰現象がなくなる臨界点以上に加圧して用いる。このため、気液分離や再循環が不要となる上、冷却水流量が約1/10に低減し、システムが簡素化される。また、発電効率が高まり、経済性が向上する。さらに、高速炉心との適合性もよく、核燃料の増殖も可能である。

今日、原子力を取り巻く状況はますます複雑化の様相を呈しているが、安全性、経済性、核拡散抵抗性、社会的受容性に優れた革新的な原子炉の開発・実用化がこの状況を打開する鍵であろう。今回GIFがリストアップした次世代型原子力システムには、わが国が世界の研究開発のトップを走っているものがいくつかある。今後、こうした技術の具体化に向けた取り組みが求められよう。

## 製造技術分野

### ①環境にやさしいフッ素化芳香族化合物の新しい製造法

フルオロベンゼンなどのフッ素化芳香族化合物は医薬や農薬の中間化合物として大量に製造さ

れている重要な化合物である。しかし、フルオロベンゼンは、通常、アニリンやクロロベンゼンを経由した多段階のプロセスで合成され、多量の廃棄物が副生しコストが高いなどの問題点を有している。これに対し、デュポン社の M. A. Subramanian ら

は、主な副生成物が水で、しかも製造コストの安価なフッ素化芳香族化合物の新しい製造法を開発したと発表した (Science, vol.297, p.1665 (2002))。

M. A. Subramanian らの開発した方法は、ベンゼン、フッ化水素 (HF) および酸素 (O<sub>2</sub>) からフル

オロベンゼンを合成するもので、ポイントは、ベンゼンをフッ素化する能力を有すると共に、フッ化水素と酸素で再生されるフッ化金属としてフッ化銅を見出したことにある。

具体的には、フッ化銅 ( $\text{CuF}_2$ ) の存在下ベンゼン蒸気を高温で流すと、フルオロベンゼンが95%

の選択率で得られる。450℃ではベンゼンの5%がフルオロベンゼンに転化されるが、550℃で行なうと転化率は約30%に向上した。反応によりフッ化銅は金属銅 (Cu) に還元されるが、金属銅はフッ化水素と酸素の混合ガスによりフッ化銅に再生され、この際水が副生する。このサイクルは、繰

り返しが可能であり、繰返しによりフッ素化能は低下しないと述べられている。

本合成法はフルオロトルエンやジフルオロベンゼン類の合成にも適用できるとの事であり、環境にやさしいプロセスとして今後の進展が期待される。

.....



## 特集①

若手研究者の活性化を促進する  
競争的研究資金（研究 Grant）の  
整備の必要性

ライフサイエンス・医療ユニット 伊藤 裕子



## 1. はじめに

第2期科学技術基本計画（平成13年度～平成17年度）において、「若手研究者の自立性の向上」に対する施策の一つとして、「若手研究者を対象とした研究費を重点的に拡充する」と提言された。これを受けて文部科学省の科学研究費補助金制度（通称、科研費）内の「37歳以下の大学等に所属する若手研究者対象（平成12年度から募集）」の募集枠に、Grant 額が高い「若手研究A」が平成14年度から新設された。また文部科学省以外の政府機関等でも若手研究者対象の競争的研究資金（研究 Grant）の募集が始まっている。

米国においては「テニュアトラック」と呼ばれる「常勤の若手研究者（大学等の助手クラス）」を対象とした研究 Grant は我が国では始まったばかりであり、今後どのような研究 Grant の整備が必要であるかを日本の若手研究者の現状を理解した上で考えることが重要である。

## 1-1

## 若手研究者支援の重要性

独立した立場を得た若手の研究者が自分のアイデアで自立して研究を行うには、教授等の研究責任者の研究予算に依存しないために、ある程度の額の研究費の支援が必要である。特に博士号取得後の10年間～15年間は研究者にと

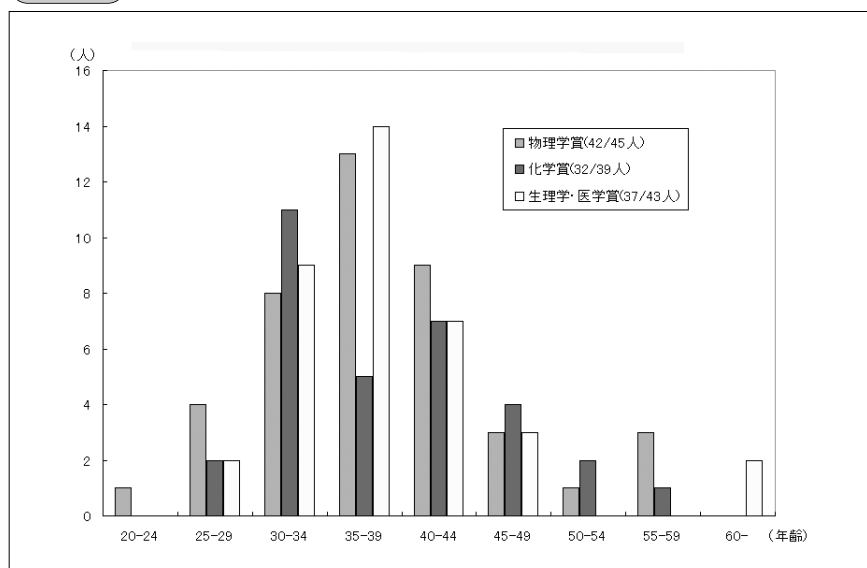
って、独立した研究思考を養うと共に自分の野心的なアイデアによる研究を開始するための大事な時期である。図表1に示すように、ノーベル賞受賞者の受賞のきっかけになった論文の発表時の年齢は、生理学・医学賞および物理学賞では、35歳～39歳にピークがある<sup>1)</sup>。通常教育課程では20代後半で博士号を取得するので、これは取得10年後の時期にあたる。化学賞に関しては30歳～34歳という他の二つの賞に比べて若い時期に最初のピークがあり、二つ目のピークは40歳～44歳にあった。これは研究分野別に研究人材の育成の方法を考えるべきであることを示唆している。

また30歳から44歳までに受賞

のきっかけになった論文を書いた研究者は、生理学・医学賞では受賞者中の81%、化学賞では72%、物理学賞では71%であり、特に生理学・医学賞の分野に関しては、この15年間に創造性に富んだ研究の芽が生じる可能性を示唆している。

本稿では、我が国の若手の研究者（大学等の助手クラスの研究者）が自己の創造性を伸ばし、世界的な科学の発展に貢献することができる研究業績を挙げるために必要な研究 Grant のあり方を考え、特に米国の若手研究者対象の研究 Grant と内容等の比較を行い、今後の我が国の若手研究 Grant に盛り込むべき事項の検討を行う。

図表1 ノーベル賞受賞者の業績を上げた年齢の分布（1981～2000年）



(平成13年版科学技術白書より)

## 2. 米国の若手研究グラント（生物・医学分野）

米国厚生省（US Department of Health and Human Service）管轄下の世界最大の生物・医学研究機関であり、同時に研究グラントの出資機関でもある国立衛生院（NIH）における若手研究グラント（K Awards）について紹介する。

K Awardsは研究人材育成のための研究グラント（トレーニンググラント）の一つであるが、大学院生やポスドクを対象にした研究

グラントであるFおよびT Awardsとは明確に区別されており、常勤の職についた若手の研究者が研究のキャリアを積み上げ、独立した研究者になるまでの段階を支援する研究グラントである<sup>2)</sup>。

### 2 - 1

#### K Awardsの種類

現在、NIHで募集されているK

Awardsを図表2に示した。NIHは医学研究が中心の政府機関であり、基礎医学研究（K01, K02, K05, K07, K18, K22, K25, K26が該当）あるいは臨床医学研究（K08, K12, K23, K24, K30が該当）に関して研究に従事する様々な段階の若手研究者に対して研究グラントの支援をしている<sup>2)</sup>。

図表2 K Awardsの概要

グラントの名称	対象者	期間	1件当たりの金額／年
K01 (Mentored Research Scientist Development Award)	指導者の下で研究経験を積み、独立した研究者を目指す研究者	3～5年	12万5900ドル (約1千500万円)
K02 (Independent Scientist Award)	独立したばかりの研究者	5年	12万5900ドル (約1千500万円)
K05 (Senior Scientist Award)	独立した研究者	5年	12万5900ドル (約1千500万円)
K07 (Academic Career Award)	臨床医学研究者を目指す研究者	2～5年	約12万8000ドル (約1千530万円)
K08 (Mentored Clinical Scientist Development Award)	指導者の下で研究経験を積み、独立した臨床医学研究者を目指す研究者	3～5年	約12万ドル (約1千440万円)
K12 (Mentored Clinical Scientist Development Program Award)	指導者の下で研究経験を積み、独立した臨床医学研究者を目指す研究者	5年	約40万ドル (約4千800万円)
K18 (Career Enhancement Award For Stem Cell Research)	Stem Cellを用いた研究を行うためにトレーニングが必要な研究者	6ヶ月～2年まで	16万6700ドル (約2千万円)
K22 (Career Transition Award)	ポスドク経験2年以上で独立した研究者として2年以下	3年以下	12万5900ドル (約1千500万円)
K23 (Mentored Patient-Oriented Research Career Development Award)	指導者の下で研究経験を積み、独立した臨床医学研究者を目指す研究者	3～5年	約14万ドル (約1千680万円)
K24 (Mid-career Investigator Award In Patient-Oriented Research)	臨床医学研究歴15年以内の臨床医学研究者	3～5年	約10万ドル (約1千200万円)
K25 (Mentored Quantitative Research Career Development Award)	工学を修めた経歴のある研究者で、基礎医学あるいは臨床医学の研究を目指す研究者	3～5年	約14万ドル (約1千680万円)
K26 (Mid-career Investigator Award In Mouse Pathobiology Research)	マウス病理学分野の研究歴15年以内の研究者	3～5年	12万5900ドル (約1千500万円)
K30 (Clinical Research Curriculum Development)	臨床医学研究分野での新しいトレーニングプログラムの開発等を行う研究者	5年	20万ドル (約2千400万円)

\*1ドル＝120円

(NIHのHPを参考にして科学技術動向研究センター作成)

2 - 2

## K Awardsは育てるグラント

K Awardsには若手の研究者を「育てる」という概念が盛り込まれており、図表3-1および図表3-2に示すように基礎医学研究者と臨床医学研究者の研究者としてのキャリアパスの違いを明確にした上で、各種研究グラントの設定を行なっている。

2 - 3

## K Awardsの総額の変遷

K Awardsの総額は、図表4で示すように1999年から急激に伸び2001年では1998年総額の約2倍近い4億ドルにまで増大した。これは2001年のNIHの総予算（約205億ドル）の2%程度に相当する。また2001年のK awardsの総採択件数は3,135件に達している<sup>2)</sup>。

2 - 4

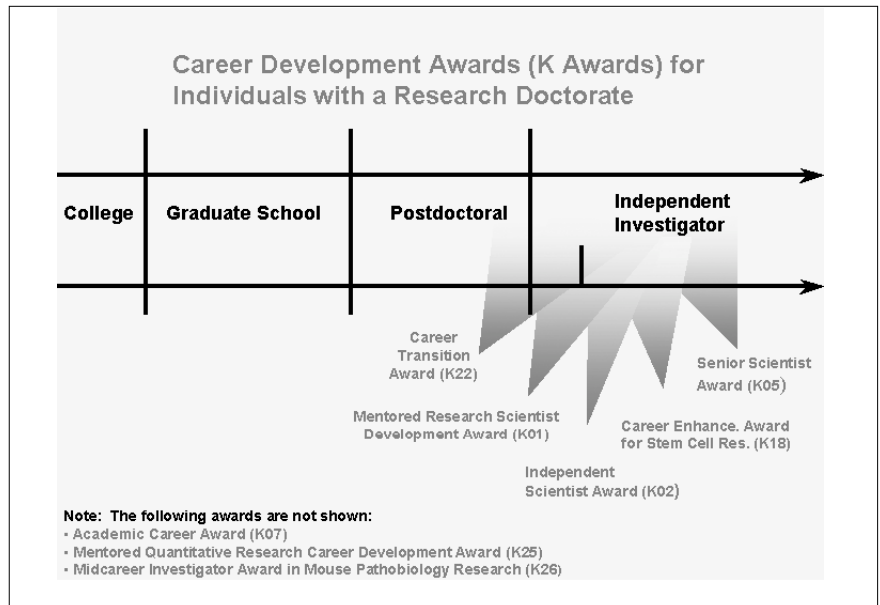
## まとめ

NIHにはかつてR29という常勤の研究職に就いたばかりの若手研究者対象のグラントがあったが、1998年6月に廃止された。R29の廃止以降は研究歴での制限のないR01に積極的に応募することが、1997年12月19日発表のNIH GUIDE（Volume 26, Number 40）において勧められている。R01の申請書類中には、「常勤の研究職に就いたばかりの研究者であるかどうか」を記す項目が設けられている。

また2-2に述べたように1999年以降のK Awards額の急激な増加は、R29の代りにK Awardsを若手研究グラントの中心に据えるというNIHの考え方が表れていると推測される。

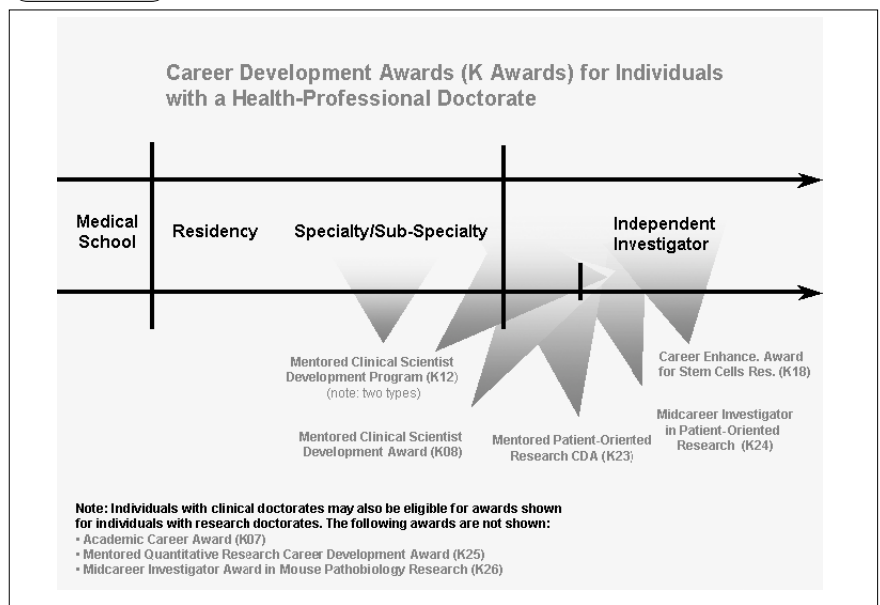
K Awards以外で若手研究者対象のグラントとして機能している

図表3-1 基礎医学研究を行う研究者に対するK Awardsの考え方



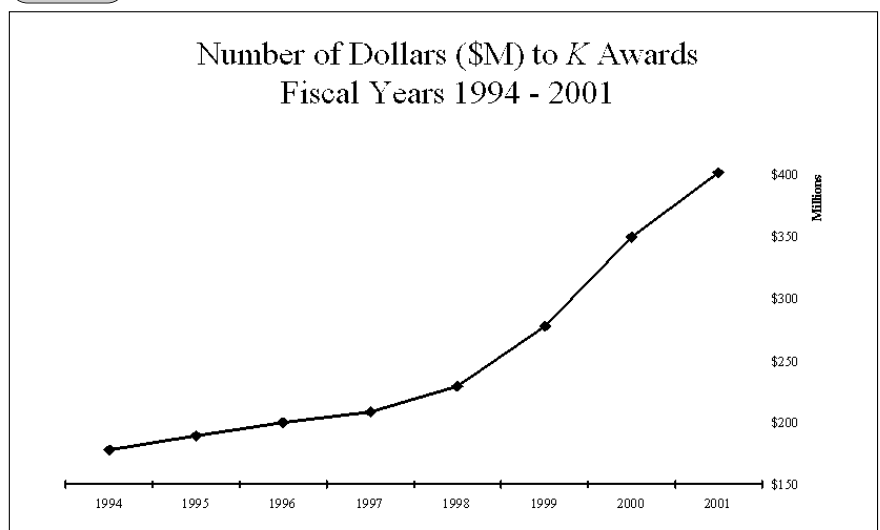
(NIHのHPより転載)

図表3-2 臨床医学研究を行う研究者に対するK Awardsの考え方



(NIHのHPより転載)

図表4 K Awardsの総額の変化



(NIHのHPより転載)

ものにR03がある。R03は研究歴による応募制限は無く、グラント支給額は約5万ドル/年とR01（50万ドル/年以上）に比較して少な

いのでsmall grantといわれており、多くの場合はグラント申請時に予備的な研究結果を必要としない。R03はグラント支給期間内に

研究結果が得られるかどうか分からない挑戦的な研究、あるいは新しい実験手法を試すという場合に適した研究グラントである。

### 3. 米国の若手研究者の現状

1998年度の一年間に自然科学分野（工学を含む）で博士号を授与された研究者数を日米で比較すると、米国では1万9,566人で日本の6,576人の約3倍である<sup>3)</sup>。日米の大学数を比較すると、日本の国公私立大学（短期大学を除く）の合計は649校であり、米国はその約2倍の1,478校である<sup>4)</sup>。数字の上では、博士号取得者が大学の常勤の研究職を得る機会は、日米であり変わりがないように見える。しかし米国の研究者は常勤の職に就いた後に、日本の研究者とは異なる厳しい研究上のキャリアパスを経る。

#### 3 - 1

#### 米国の研究者のキャリアパス

米国と日本の若手研究者の大きな違いは、博士号取得後のキャリアパスである。多くの米国の研究者は、博士号取得→ポスドク→テニユアトラック→テニユアという道を経る。テニユアとは終身在職権を持つ研究者の職位であり、テニユアトラックはテニユアになり得る研究者の職位である。日本の職位を当てはめると、テニユア＝

正規の職員、テニユアトラック＝任期付任用者に相当すると言えるかもしれないが、我が国の任期付任用者（大学教員）の数は2,884人であり、全教員の2%（平成13年）<sup>5)</sup>にすぎず、研究者の一般的なキャリアパスではない。しかし平成10年度から平成13年度の3年間で、任期付任用者数は29倍以上に急増しており、今後、これが米国型のキャリアパスになり得るのかどうか注目すべきだろう。

#### 3 - 2

#### 常勤職員中のテニユアトラックの割合

米国国立科学財団の「Science and Engineering Indicators 2002」の統計資料<sup>6)</sup>によると、大学に所属している博士号取得後4年から7年の若手研究者（教員を含む）の65%が常勤職員であり、その内の10%がテニユア、42%がテニユアトラックである（図表5）。常勤職員の半分近くを占める「それ以外」に該当する職は、テニユアでもテニユアトラックでもない研究職（および教育職）である。この職位の研究者は研究業績をつ

くってから、改めてテニユアやテニユアトラックの職位を得るために就職活動をする。これは米国の若手研究者のキャリアパスの厳しさを示している。

#### 3 - 3

#### テニユアトラックからテニユアへの昇格の要件

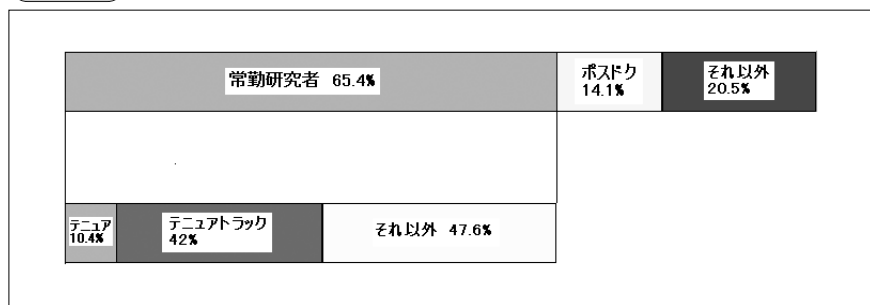
研究センターの大学（324機関）の教員の96%は、テニユアに昇格するために重要な要件として「論文数」と「研究グラント数」を挙げている（図表6）<sup>7)</sup>。テニユアはテニユアトラックと比べると、生活の安定が約束され自由に研究を遂行することができる。若手研究者はテニユアを得るために、必然的に研究グラント数を増やすように努力することになる。このような熾烈な競争は米国全体の科学研究レベルを押し上げるのに役立っていると思われる。

#### 3 - 4

#### 研究グラントの獲得は組織への貢献

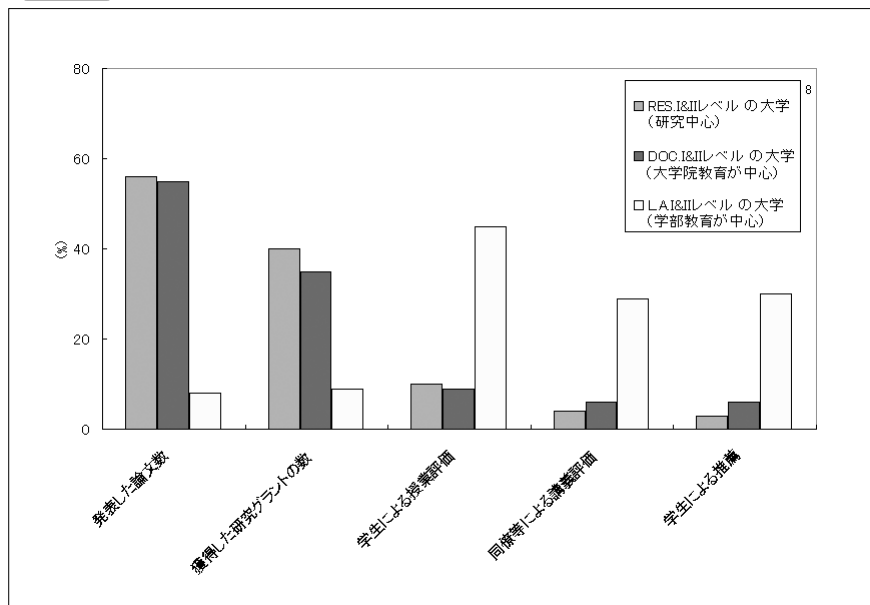
研究グラントは研究機関にとって「所属研究者の研究が第三者によって評価された結果」だけでなく、「直接的な経済上の貢献」という意味を持つ。これはオーバーヘッド（overhead）と言い、研究者は獲得した研究グラントから運営費として所属の研究機関に一定の割合の費用を支払う義務がある。その割合は大学や研究機関により異なり、100%のoverheadを要求する研究機関の研究者が3万ドルの研究予算を獲得した場合、

図表5 大学に所属する米国研究者の職位（博士号取得後4～7年後）



（米国国立科学財団の「Science and Engineering Indicators 2002」より科学技術動向研究センター作成。1999年統計。）

図表6 米国の大学職員がテニユア取得に「最重要」だと考えること



(参考文献<sup>7)</sup> より科学技術動向研究センター作成)

研究機関にはそれとは別に研究 Grant を支給する機関から3万ドルが入る。

民間の研究 Grant 等では、overhead が払えないことを明記し

ている場合がある。この場合、例えば50%のoverheadを要求する研究機関に所属する研究者が3万ドルの研究 Grant を獲得すると、そこから1万5千ドルをover-

headとして所属の研究機関に支払わねばならない。

つまり高額な研究 Grant を数多く獲得する研究者は、所属研究機関への貢献が大であると評価される。

### 3 - 5

## まとめと問題点

米国の若手研究者は、研究 Grant の獲得如何で生活の安定や昇格が左右される立場にあり、研究 Grant の無い研究生生活は考えられない。当然、研究 Grant 獲得に向かう姿勢は終身雇用である日本の若手研究者とは異なる。米国の若手研究者は常にストレスに晒されており、インターネット上では若手研究者のキャリアパスやサバイバル法が盛んに議論されている<sup>9)</sup>。

## 4. 我が国の若手研究者の研究 Grant に対する意識

米国の若手研究者にとって研究 Grant 獲得が研究者のキャリアを続けるために大切であることは既に述べた。では、日本の若手研究者は研究 Grant についてどう考えているだろう。

平成14年9月に発表された文部科学省 科学技術・学術政策局 調査調整課による「平成13年度 我が国の研究活動の実態に関する調査報告」で実施されたアンケート結果を用いて、若手研究者の研究 Grant に対する意識を明らかにすることを試みた<sup>10)</sup>。アンケートの対象者は、平成12年に科学技術振興事業団の文献情報データベースに登録された論文の第1著者または第2著者である産学官の研究者である。その内の1,200名を無作為に抽出し、調査票を郵送することによりアンケートがおこなわれた。有効回答者数は889名で

あり、研究者の所属機関は、大学 (35%)、公的機関 (15%)、民間 (46%) に分かれたが、35歳未満の若手研究者の割合はいずれの機関においても10%程度である。またアンケートに回答した研究者の研究分野は、ライフサイエンス (22%)、情報・通信 (18%)、材料・ナノテクノロジー (18%)、環境 (9%)、エネルギー (8%) 等、多岐にわたった。

### 4 - 1

## 研究費に占める研究 Grant の割合は増えている

科学技術関係費に占める競争的研究資金 (研究 Grant) の割合と額は年々増加しているが (平成7年から平成12年で2.4倍に拡充)<sup>1)</sup>、アンケート対象研究者の研究費内に占める「競争的研究資金 (研究

Grant)」の割合はどうであろうか？

同様な質問は平成12年度調査においてもされており、図表7に平成12年度と平成13年度の結果を並べて示した。回答は、研究者自身が獲得した研究費のみの割合ではなく、所属研究室やグループで獲得している競争的研究資金を含めた割合である。

大学、公的機関、民間所属のいずれの研究者に関しても、平成12年度に「競争的研究資金は10%未満である」と回答した研究者の割合は、平成13年度の調査では減少した。また、大学・公的研究機関では「競争的研究資金は50%以上100%未満である」、民間では「10%以上30%未満である」と回答する研究者の割合が、平成12年度に比較して平成13年度では増加した。

4 - 2

# 研究グラント導入を歓迎する若手研究者と歓迎しない若手研究者

競争的資金（研究グラント）が年々増大している状況を研究者、特に若手研究者はどう考えているだろうか？

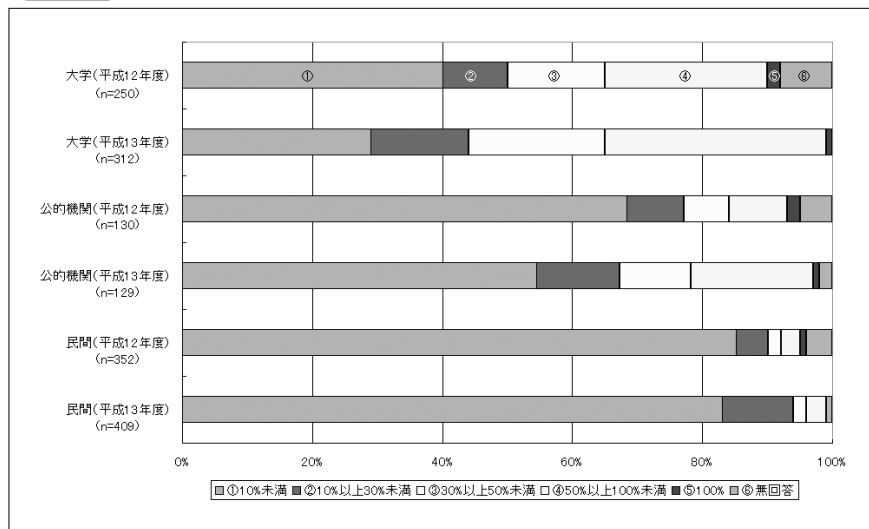
「我が国の科学技術関係経費のうち競争的資金の割合を増加させていくことをどう思うか」についてのアンケート結果を所属および年齢別に示した（図表8-1、図表8-2、図表8-3）。

大学所属の研究者（図表8-1）では、30歳以上35未満の研究者の50%以上が「競争的資金の割合を増加すべき」と答え、この割合は他の年齢層と比較して最も多かった。また、「経常的資金を増やすべき」と答えた割合は最も少なかった。一方、35歳以上40歳未満の研究者では、「経常的資金を増大すべき」と答えた人の割合が他の年齢層と比較して最も多かった。

公的機関所属の研究者（図表8-2）では、「競争的資金の割合を増やすべき」と答えた人の割合は、どの年齢層でも、大学や民間所属の研究者と比較して相対的に少なかった。30歳以上35歳未満の研究者では、「競争的資金を増大すべき」と「経常的資金を増大すべき」と答えた人が同じ割合で存在した。年齢が上がるにつれて「現状のままで良い」と答える割合が増え、「経常的資金を増やすべき」と答える人の割合は減少した。

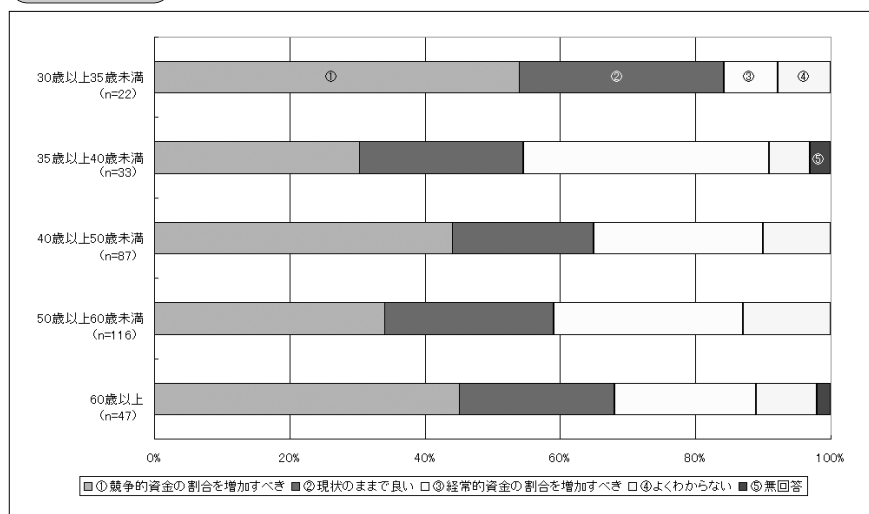
民間の研究者（図表8-3）では、「競争的資金の割合を増やすべき」と答えた割合が30歳以上35歳未満の研究者で一番少なく、年齢が上がるとともに「増やすべき」と答えた割合は増加した。また、30歳以上35歳未満の研究者で「よくわからない」と答えた人

図表7 研究費に占める競争的資金の割合



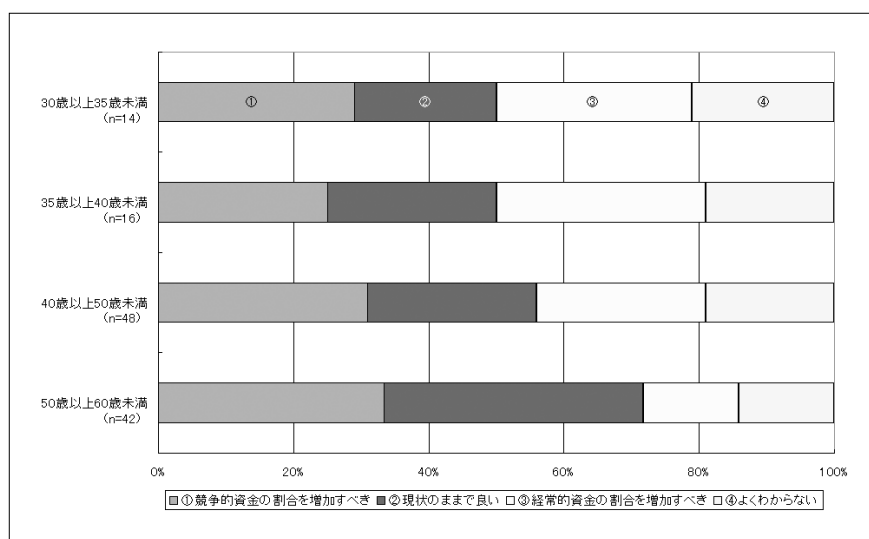
（平成13年度「我が国の研究活動の実態に関する調査報告」を参照し科学技術動向研究センター作成）

図表8-1 我が国の研究者の競争的資金の割合に対する意識（大学）



（平成13年度「我が国の研究活動の実態に関する調査報告」のアンケート結果から、科学技術動向研究センター作成）

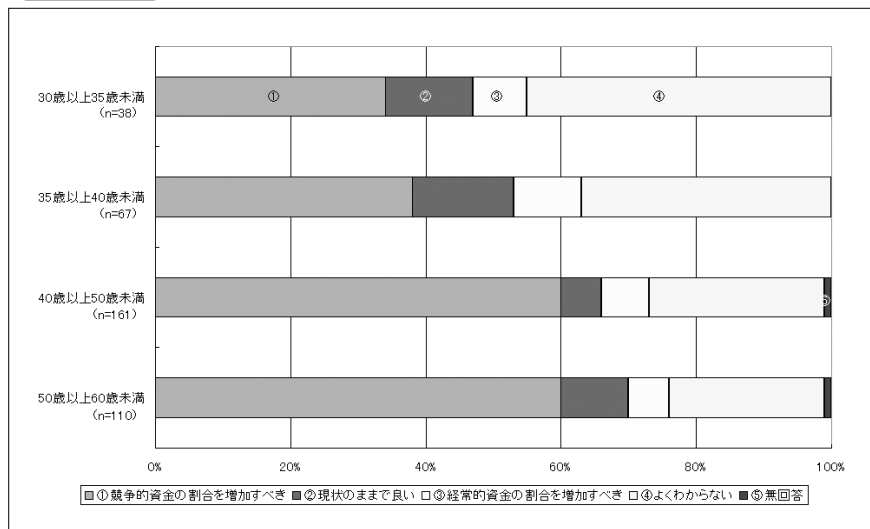
図表8-2 我が国の研究者の競争的資金の割合に対する意識（公的機関）



（平成13年度「我が国の研究活動の実態に関する調査報告」のアンケート結果から、科学技術動向研究センター作成）



図表 8 - 3 我が国の研究者の競争的資金の割合に対する意識（民間）



（平成13年度「我が国の研究活動の実態に関する調査報告」のアンケート結果から、科学技術動向研究センター作成）

の割合が一番多く、年齢が上がるにつれてその割合は減少した。

大学所属の30歳以上35歳未満の研究者は、「競争的資金導入」に対する意識が高いことが示されたが、35歳以上40歳未満の研究者では一転して「競争的資金導入」に消極的であることが示された。この違いは職位によると推測される。70%以上の「30歳以上35歳未満の研究者」が、職位は「助手・講師クラス」とであると回答しており、「35歳以上40歳未満の研究者」では「助教授クラス」とあるという回答が得られている。職位が上がり研究室を運営する立場になると研究費に対する意識は変化し、「競争的資金導入」に消極的になるのはなぜだろうか？

公的機関や民間所属の研究者では、30歳以上35歳未満の研究者層は「競争的資金導入」に消極的であるが、年齢層が上がるにつれてその意識に変化がみられた。これらの競争的資金に対する意識の違いは何が原因だろうか？

#### 4 - 3

### 若手研究者の研究費は経常的資金が中心

大学所属の「30歳以上35歳未

満の研究者」を除くと、どの研究機関においても、年齢層が上がるにつれて「競争的資金導入」に積極的である傾向が4-2で示された。何故、年齢の若い研究者は、「競争的資金導入」に消極的なのかを理解するために、競争的資金の割合を年齢別に示した（図表9）。35歳未満の研究者の60%が、競争的資金の占める割合は0%であると回答している。

経常的資金中心に研究をおこなっている若手研究者は、「競争的資金」の増大に伴い「経常的資金」が減らされて、現在おこなってい

る研究に支障が出ることを危惧している」と推測される。

#### 4 - 4

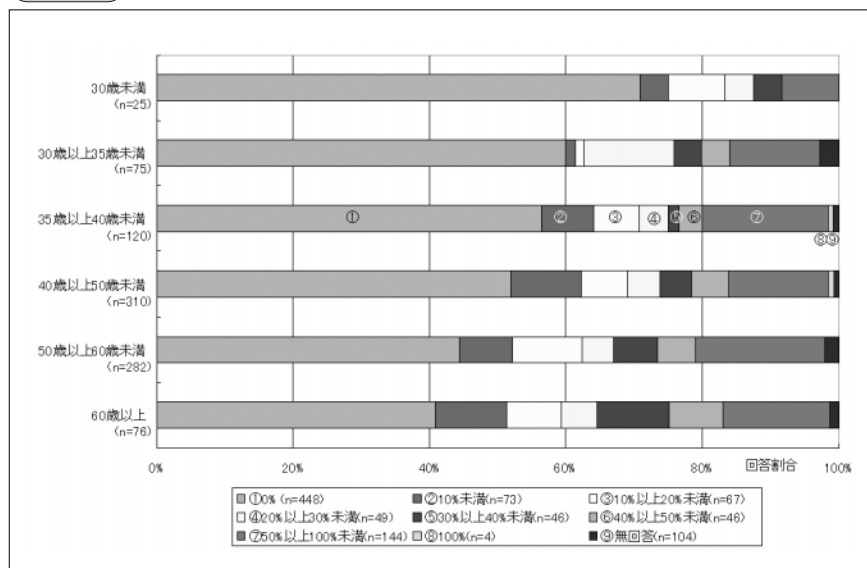
### 苦悩する大学の研究者

統計資料からは浮かび上がってこない大学の研究者の「研究資金に対する意識」を理解するために、4-2で「競争的資金を増加すべき」または「経常的資金を増加すべき」と回答した大学の研究者にその理由を複数回答で選んでもらった結果を以下に示す。

「競争的資金増加」に対する理由として30歳以上35歳未満の研究者は、「通常の研究費では支出が難しい大きな研究資金を確保できるため」という回答が多く、35歳以上40歳未満の研究者では、「研究のスクラップ&ビルドを促進するため」および「硬直化した研究予算の是正につながるため」という回答が多かった。50歳以上60歳未満の研究者では、「評価を受けた価値ある研究のみに資金が配分されるため」および「資金を得るために、評価される研究内容を目指すようになるため」が多かった。

「経常的資金増加」に対する理由として、30歳以上35歳未満の

図表 9 我が国の研究費に占める競争的資金の割合（年齢別）



（平成13年度「我が国の研究活動の実態に関する調査報告」より）

研究者と50歳以上60歳未満の研究者では「競争的資金では、研究内容が流行に左右され、特定分野にのみ重点的に配分される恐れがあるため」、35歳以上40歳未満の研究者では「競争的資金を確保できなかった場合、研究を継続できなくなる可能性があるため」という回答が多かった。

競争的資金の継続的な確保に苦悩する年齢層の研究者が、「競争的資金導入」に消極的であるのは当然であるかもしれない。

#### 4 - 5

### 研究グラント獲得に苦慮する若手研究者

若手研究者は何件の競争的資金を獲得しているのだろうか？

調査時点（平成13年12月）において「自ら応募して獲得している競争的資金の件数」に対する回答を図表10-1、図表10-2、図表10-3に示した<sup>10)</sup>。

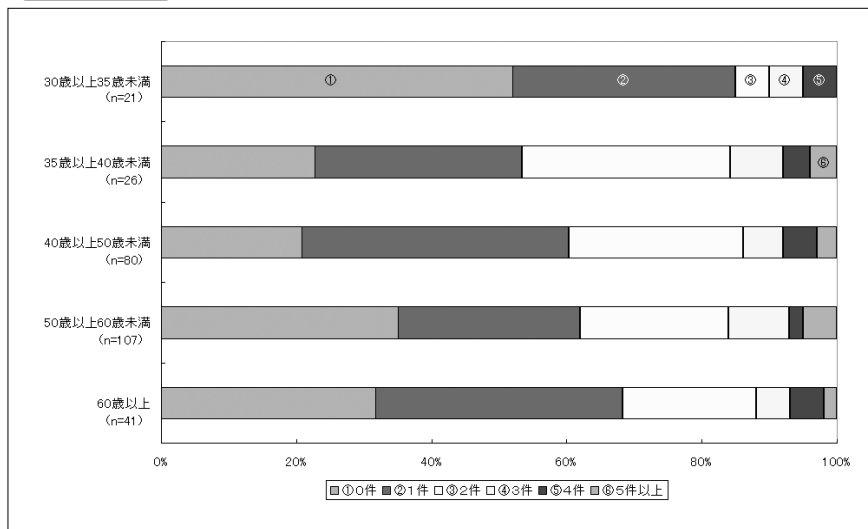
大学所属の研究者（図表10-1）では、30歳以上35歳未満の研究者の50%以上が、「獲得しているグラント件数は0件」と答えた。35歳以上40歳未満の研究者では、80%近くの研究者が「1件以上」のグラントを獲得していた。

公的機関所属の研究者（図表10-2）では、30歳以上35歳未満の研究者の80%が「獲得しているグラント件数は0件」と答えた。一方、35歳以上40歳未満の研究者の50%以上は、「1件以上」のグラントを獲得していた。

民間の研究者（図表10-3）では、30歳以上35歳未満の研究者の90%以上が、「獲得しているグラント数は0件」と答えた。年齢が上がるにつれて、「1件以上」のグラントを獲得している割合は増加したが、大学や公的機関所属の研究者に比べると割合は低く、最大で20%程度だった。

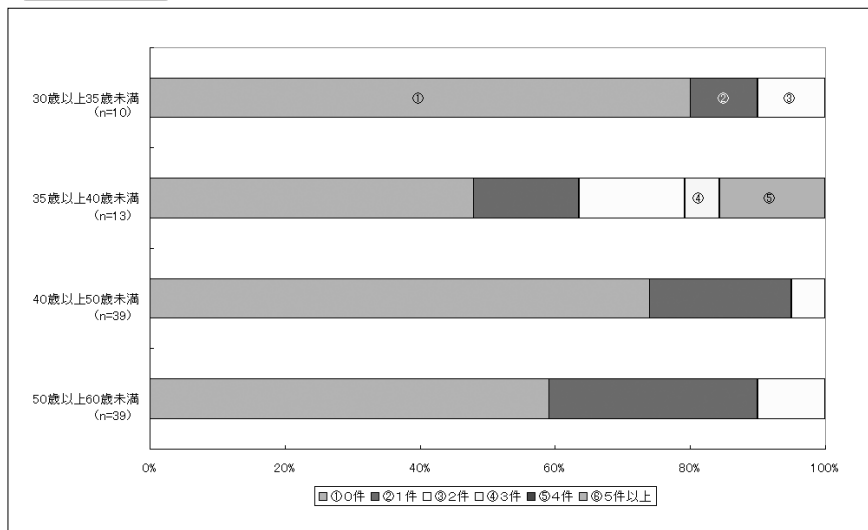
30歳以上35歳未満の若手研究

図表10-1 自ら応募して現在獲得しているグラント件数（大学）



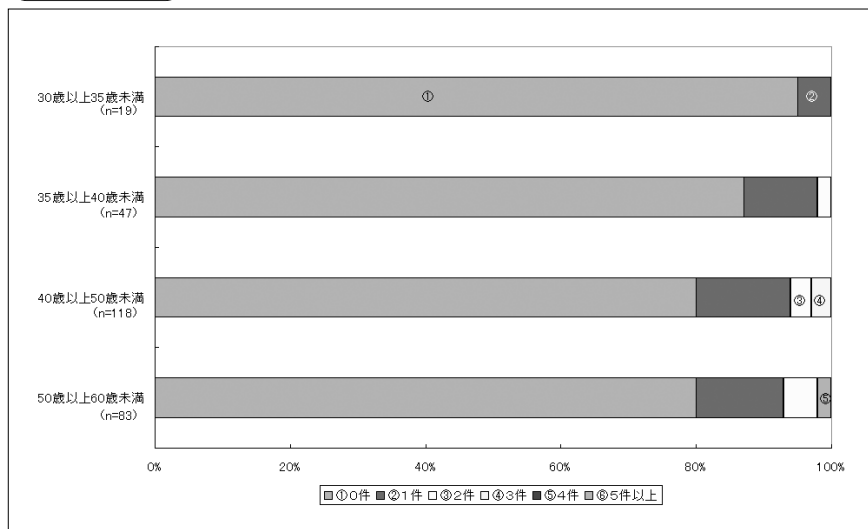
（平成13年度「我が国の研究活動の実態に関する調査報告」のアンケート結果から、科学技術動向研究センター作成）

図表10-2 自ら応募して現在獲得しているグラント件数（公的機関）



（平成13年度「我が国の研究活動の実態に関する調査報告」のアンケート結果から、科学技術動向研究センター作成）

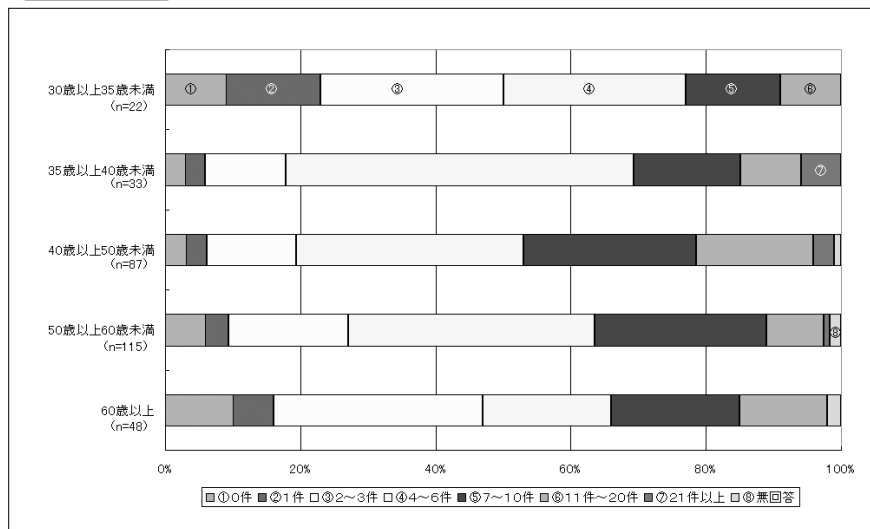
図表10-3 自ら応募して現在獲得しているグラント件数（民間）



（平成13年度「我が国の研究活動の実態に関する調査報告」のアンケート結果から、科学技術動向研究センター作成）

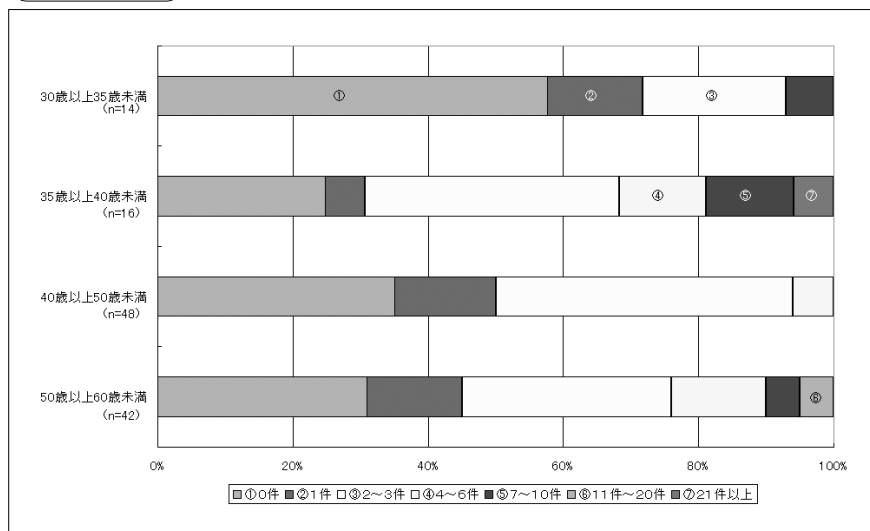


図表 11 - 1 最近5 ヶ年に応募した Grant 件数（大学）



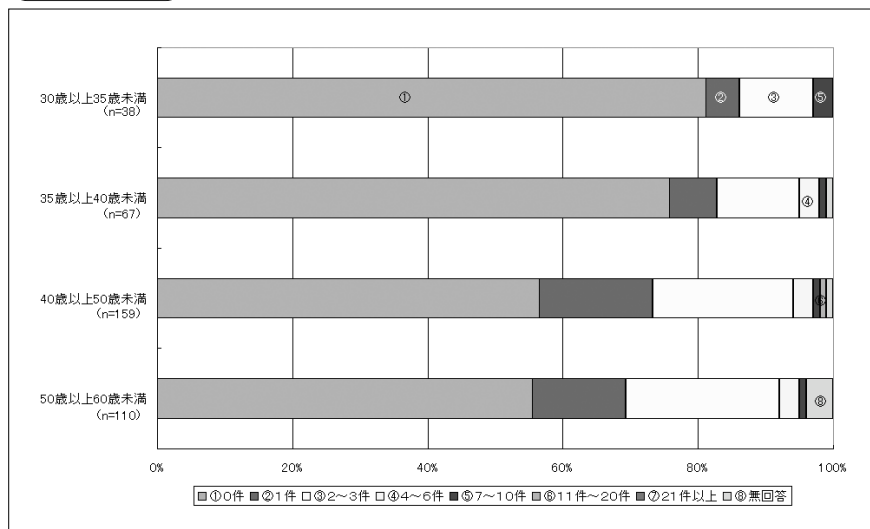
（平成13年度「我が国の研究活動の実態に関する調査報告」のアンケート結果から、科学技術動向研究センター作成）

図表 11 - 2 最近5 ヶ年に応募した Grant 件数（公的機関）



（平成13年度「我が国の研究活動の実態に関する調査報告」のアンケート結果から、科学技術動向研究センター作成）

図表 11 - 3 最近5 ヶ年に応募した Grant 件数（民間）



（平成13年度「我が国の研究活動の実態に関する調査報告」のアンケート結果から、科学技術動向研究センター作成）

者が研究 Grant を獲得している割合は、どの所属機関においても、年齢層が上の研究者に比較すると低いことが示された。

#### 4 - 6

### 若手研究者は研究 Grant の獲得競争に参加しているか？

競争的資金の獲得に意欲のある若手研究者が、高い競争率のために獲得に失敗している可能性を考えて、図表 11 - 1、図表 11 - 2、図表 11 - 3 に「最近5 ヶ年以内に応募した競争的資金の件数（年齢別）」を示した<sup>10)</sup>。

大学所属の研究者では（図表 11 - 1）、どの年齢層でも 90 % 以上の研究者が最近5 ヶ年に「1 件以上」の Grant に応募していた。30 歳以上 35 歳未満の研究者では、他の年齢層に比べると「0 ~ 1 件」の割合が大きいことが示された。また 50 % の研究者が 4 件以上に応募していた。

公的機関では（図表 11 - 2）、30 歳以上 35 歳未満の研究者の 60 % 近くが最近5 ヶ年に Grant 応募をしていなかった。一方、35 歳以上 40 歳では、75 % 以上の研究者が、1 件以上の Grant に応募していた。

民間では（図表 11 - 3）、30 歳以上 35 歳未満の研究者の 80 % 以上が最近5 ヶ年に Grant の応募をしていなかった。年齢が上がるにつれてその割合は減少し、50 歳以上 60 歳未満では、45 % 以上の研究者が 1 件以上の Grant に応募していた。

大学所属の若手研究者は Grant 応募をしているが、獲得に失敗している状況が示された。一方、公的機関や民間の若手研究者の Grant 応募件数は低く、初めから競争的資金の獲得競争に参加していないことが示された。

## 4 - 7

## まとめ

大学、公的機関、民間に所属している若手研究者の直面している問題の違いが見られた。大学に所属している若手研究者は、「競争的資金導入」に対して積極的であり応募もしているが、グラントの獲得件数は低いことが示された。公的機関に所属している若手研究者の「競争的資金に対する意識」は大学所属の若手研究者と比べると低く、経常的資金の増加を望み、グラントの応募をあまりしていないので、1件以上のグラントを獲得している若手研究者の割合はか

なり低い。民間の若手研究者の「競争的資金に対する意識」は、公的機関の研究者と同程度に低く、グラントの応募はほとんどしておらず、1件以上のグラントを獲得している若手研究者の割合は極めて低い。

所属機関ごとに若手研究者活性化のための対策を考える必要がある。

大学所属の若手研究者には、研究業績で不利にならない「若手研究グラント」の拡充により、グラント獲得件数を上げることが必要である。現状が続くと、若手研究者の意欲を削ぐことにもなりかねない。

公的機関所属の若手研究者には、研究グラントに対する意識改

革とともに、関係官庁による「若手研究グラント」支援が必要である。

民間の若手研究者に対しても、研究グラントによる支援が必要である。経済産業省は「基盤技術研究促進事業（民間基盤技術研究支援制度）」により、民間企業等に研究支援をおこなっている。このような研究グラント中に「若手研究グラント」を盛り込む等の工夫が欲しい。本年度（2002年度）のノーベル化学賞受賞者が民間企業所属の研究者であり、20代での研究が受賞につながったという事実は民間企業の若手研究者への研究支援も我が国の科学研究の発展に重要であることを示している。

## 5. 日本と米国の若手研究グラントの比較

日本と米国の政府予算による代表的な若手研究グラントの比較を行ない、日本の若手研究グラントの問題点を考える。

## 5 - 1

## 若手研究グラントの対象者

図表12-1と図表12-2に日本

と米国の代表的な若手研究グラント（政府予算による）を示した。両者での大きな違いは「対象者」の項目にある。米国では応募者を「自立した研究者としての研究年数」で制限しており、日本の単純な年齢制限より現実に則している。年齢制限をおこなうと、一度社会に出てから大学院に入り直し

た人、あるいは他の分野を既に修めた人など多様な人材の排除につながる。

## 5 - 2

## 一件当たりの金額

米国の一件当たりのグラント金額は日本円に換算すると約1千

図表12-1 我が国の代表的な若手研究者対象の研究グラント（政府資金による）

グラントの名称	組織	対象者	期間	1件当たりの金額/年	予算（平成14年度）
科学研究費補助金制度	文部科学省	37歳以下	2～3年	500万円～3千万円以下	19億円
若手研究A					
若手研究B	文部科学省	37歳以下	2～3年	500万円以下	100億円
科学技術振興調整費 若手任期付研究員支援	文部科学省	35歳以下の任期付	任期内5年限度	500万円～1千500万円程度	15億円
産業技術研究助成事業	新エネルギー・産業技術総合開発機構（経済産業省）	35歳以下講師・助手	3年以内	1千500万円程度	52.8億円
新技術・新分野創出のための基礎研究推進事業 若手研究者支援型	生物系特定産業技術研究推進機構（農林水産省）	39歳以下	5年	約2千万円	8.5億円
地球環境研究総合推進費 課題検討調査研究 若手育成型	環境省	35歳以下	1～2年	数百万～1千万円	2千万円
戦略的情報通信研究開発推進 研究主体育成型研究開発	総務省	35歳以下（情報通信分野）	3年以内	1千万円	4.5億円の内数

（各省のHPを参照あるいは担当者に問い合わせる等により科学技術動向研究センター作成）

図表 12 - 2 米国の代表的な若手研究者対象の研究グラント（政府資金による）

グラントの名称	組織	対象者	期間	1件当たりの金額／年*	予算（年度）
CAREER Program	NSF 国立科学財団	テニュアトラック	5年	約10万ドル (約1千200万円)	6千万ドル (2002) (約72億円)
K Award	NIH (DHHC) 厚生省	テニュアトラック	概ね5年	10万～40万ドル (1千万～4千万円)	約4億ドル (2001) (約480億円)
Young Investigator Program	DOD-US Navy (ONR) 国防総省	テニュアトラック (博士号取得後5年以内)	3年	約10万ドル (約1千200万円)	840万ドル (2002) (約10億円)
Outstanding Junior Investigator Program	DOE エネルギー省	独立した研究者 (研究歴5年以内)	数年	6万ドル (720万円)	50万ドル (2003) (6千万円)
New Investigator Awards	USDA 農務省	独立した研究者 (研究歴5年以内)	数年	10万ドル前後 (1千200万円前後)	980万ドル (2002) (約12億円)
New Investigator Program	NASA 米国航空宇宙局	テニュアトラック (博士号取得後5年以内)	3年	8万～10万ドル (約1千万円)	200万ドル (2002) (約2億円)

\*1ドル＝120円（米国政府機関の名称の和訳は平成13年度版科学技術要覧を参照）

（米国各省のHP等を参照し科学技術動向研究センター作成）

200万円程度が主流である。この中には、研究者自身の給料の一部や全額が含まれる。博士課程修了後1～4年経た若手の研究者が自分の給料の全額をグラントから出す場合を考えると、同様な研究歴を持つ人が得ている平均的な給料は年間5万ドル（600万円）であるので<sup>11)</sup>、この金額を引くと、研究に使用できる金額は600万円程度になる。

一方、日本の一件当たりのグラント金額は、500万円以下と1千万円以上の二つのグループに大別できる。日本の研究者はグラントから自分の給料を出す必要がなく獲得したグラント金額の大部分を研究に使用できるので、1千万円以上のグラントを獲得する日本の若手研究者の研究費は、米国の若手研究者が研究に使用できる金額を上まわる可能性がある。

しかし、研究グラントを一件しか持たない米国の研究者は、3章で述べた理由から少数であると考えられるので、実質的に自由に使用できる研究費の額は米国の方が潤沢であると推定される。

### 5 - 3

## 若手研究者数からみた 日米若手研究グラントの比較

科研費は「人文・社会科学から自然科学まであらゆる分野」という幅広い分野を対象にした日本最大の研究グラントであり、米国では科研費のような広い分野を支援するのが国立科学財団による研究グラントである。しかし国立科学財団の「Science and Engineering Indicators 2002」の統計資料<sup>6)</sup>によると、米国政府予算による研究費の60%はNIHが支援しており、国立科学財団による支援は15%に過ぎない。そのため科研費の「若手研究」との比較は、国立科学財団のCAREER PROGRAMとNIHのK Awardsを合わせたもので行った。そしてこれらの研究グラントの対象者数と真の獲得率を見積もることを試みた（図表13）。

科研費全体の申請者の内、91.5%が国公立大学に所属している<sup>12)</sup>。この割合が「若手研究」申請者にも適用されると仮定すれば、若手研究AおよびBに申請した1万5,720人の内（若手研究はA、

B併せて一件しか申請できない）、約1万4,400人が国公立大学の所属と見積もれる。そして「若手研究」の応募要件である37歳以下に該当する国公立大学教員（短大を除く）は、平成13年10月1日現在で4万660人であるので<sup>13)</sup>、申請者は該当教員中の約35%にあたる。また採択件数は若手A,B合わせて4,361件であり、従って応募対象者数から考えると見かけの獲得率は11%である。科研費はグラント支給期間が2年～3年であり、新規・継続ともに若手研究A、B併せて一件しか申請できないので、真の獲得率は22～33%であると考えられる。

一方、博士号をもつ（研究グラントの応募要件）米国の常勤の若手教員（Junior faculty）数は4万7,368人であり<sup>14)</sup>、3章で示したように常勤若手教員の42%がテニュアトラック（応募要件）であると仮定すると、約1万9,900人が米国の若手研究グラントの応募対象者と見積もれる。実際のグラント採択件数はCAREER PROGRAMとK Awardsを合わせて3,529件であるので、従って見かけの獲得率は18%程度である。CAREER

図表13 日米の若手研究グラントの比較

	申請者数	採択件数 (採択率%)	1件当たりの 平均配分額*	応募対象者数
科研費 (2002年度) 若手研究A	1,999人	206件 (10.3%)	922万円	37歳以下の大学教員数 (2001年10月1日現在)
若手研究B	13,721人	4,155件 (30.3%)	165万円	40,660人
国立科学技術財団 (2002年) CAREER PROGRAM	—	394件	6～8万ドル (720～980万円)	博士号をもつ Junior faculty数 (1999年)
NIH (2001年) K Awards	—	3,135件 (40～60%)	12万8千ドル (1千500万円)	47,368人

\*1ドル=120円

(HP等を参照し科学技術動向研究センター作成) 2, 12～14)

PROGRAMとK Awardsはグラント支給期間が5年であり、それぞれ同一期間内に一件ずつしか申請できないので、真の獲得率は90%に近いと考えられる。

#### 5 - 4

#### まとめ

図表12では日米であり差がないようにみえた若手研究グラントは、図表13の「一件当たりの平均配分額」や「採択率」には差

がみられた。さらに、日本では平均グラント額が165万円という少額な「若手グラントB」の採択件数が多く、米国では平均グラント額が日本の約10倍の1千500万円というK Awardsの採択件数が多いことが示された。

## 6. おわりに

日本と米国の若手研究者の置かれている状況や意識は異なる。雇用の安定という面では、日本の若手研究者の方が遙かに恵まれている。多くの日本の研究者は、米国では何にも縛られずに自由な研究ができると思いがちだが、実際の米国の研究者は「研究グラント」に縛られている。締め切りの異なる複数の研究グラントの申請、中間報告、終了報告で1年が過ぎて

行く。いずれの書類も学術論文より長大で詳細に書かねばならない。中間報告の内容が良くないと容赦なく次年度は減額され、政策の変更で特定の研究分野の予算が予定せず減額されることもある(逆に増額もある)。研究グラントでポストク等の研究支援者や自分および共同研究者の給料(の一部)を賄っている場合は多い。突然の減額で給料が払えずポストクを解

雇することもあれば、研究室を畳んで民間企業に移動する研究者も珍しいことではない。

一方、日本の若手研究者の大部分は終身雇用であるため、研究グラントが獲得できなくても生活の安定は脅かされない。これは直ぐに結果がでないような長期的な研究や萌芽的研究を行い易くしている。

## 7. 結論

既に述べてきたように日本と米国の研究環境は大きく異なる。そのため日本に米国型の競争システムだけを導入しても、若手研究者の活性化は望めない。米国型研究社会のキャリアパスの厳しさと日本型研究社会の良さを理解した上で、若手研究者に対して効果的な研究支援のあり方を考える必要がある。

#### 7 - 1

#### 問題点と施策

米国の若手研究グラントと比較して、日本の若手研究グラントの問題点は以下の2点であると考えられる。

(1)「研究者を育てる」という視点がない

(2)「研究グラントの獲得は研究者としての自主独立の証である」という観念がない

これらの問題点を解決する施策は、研究グラント予算の単なる拡充ではない。特に(2)に関しては、若手研究者自身や所属研究室の教授等の指導者側の意識改革も必要である。(1)に関しては、若手研究グラントの内容に「多様性」を盛

り込むことで改善が見込まれる。

## 7 - 2

### 提言

若手研究者対象の研究グラントに盛り込むべき内容を提言する。

#### (1)「研究者を育てる」という視点を盛り込む

##### ①年齢ではなく研究歴による応募とする

一度社会に出てから大学院に入り直した人や、他分野を修めた人など多様な研究人材を排除しない。

##### ②発展段階にいる研究者のためのグラントをつくる

「常勤の研究職に就いたばかりの研究者」や「常勤研究職について5年以内の研究者」等の各段階の研究者に対する支援。「リスクの高い挑戦的な研究を行う研究者」および「他分野から移ってきたばかりの研究者」等の研究者に対する支援を行う。

##### ③グラント額を上げ、採択件数を上げる

研究グラントの申請書の作成は、研究者自身が自らの研究プロジェクトを冷静に検証することのできる絶好の機会である。この機会を多くの若手の研究者に与えることは発展段階の研究者には重要である。このために若手研究者対象の研究グラントに対して、大幅な資金投入を考えても良いかもしれない。

#### (2)「研究グラントの獲得は研究者としての自主独立の証である」という観念を与える

##### ④研究責任者としての立場を明確にする

研究グラントの申請者は単なる研究課題の実行者や研究代表者ではなく、研究責任者である。

さらに若手研究グラントに限らないが、評価システムの見直しも必要である。最終評価よりも中間評価を厳密にすることは重要である。評価は論文等の数ではなく、研究申請書に沿った研究が行われているかどうか焦点を絞る。研究上の変更事項の報告を義務づける。そして評価によっては次年度のグラント支給額を増やすまたは減らす、あるいはレベルの上の研究グラントに応募することを勧めるなどアドバイスをする等が必要である。

### 謝 辞

本特集をまとめるに当たり、「平成13年度我が国の研究活動の実態に関する調査報告」の統計資料を快く提供して下さいました文部科学省 科学技術・学術政策局調査調整課に深く感謝致します。

### 注

- 1) 平成13年版 科学技術白書 文部科学省。
- 2) NIHのWebサイト。(www.nih.gov, <http://grants.nih.gov/training/kawardresearch.htm>等)
- 3) 米国の自然科学分野の博士号取得者数は、Science and Engineering Indicators 2002, National Science Foundationの1998年の学位取得者数を参照した。数字はnatural sciences (physics, chemistry, astronomy, earth, atmospheric sciences, ocean sciences, biological sciences, agricultural sciences), Mathematics and computer sciences, Engineering分野で博士号を得た人数である。日本の自然科学分野の博士号取得者数は、文部科学省「文部科学統計要覧（平成14年版）」の平成10年度の学位取得者数を参照した。数字は理学、工学、農学で博士号を得た人数。

4) 日本の大学数は平成13年度版文

部統計要覧を参照した。国立、公立、私立大学の合計数であり、短期大学は除く。数字は平成12年度の統計である。米国の大学数は、カーネギー財団（Carnegie Foundation）による2000年版 The Carnegie Classification of Institutions of Higher Education による。カーネギー財団の分類による Doctoral/Research Universities, Master's Colleges and Universities, Baccalaureate Colleges 数を合計した。短大等は含まれていない。数字は2000年度の統計である。

- 5) 任期付任用者数は、文部科学省 高等教育局大学課による2001年12月19日発表の「大学におけるカリキュラム等の改革状況について」を参照にした。平成13年度の大学の教員数は、平成14年版文部統計要覧を参照した。
- 6) Science and Engineering Indicators 2002, National Science Foundation.
- 7) Richard M. Reis, 1997, Tomorrow's Professor, Preparing for Academic Careers in Science and Engineering, IEEE PRESS.
- 8) カーネギー財団による大学分類である。注の4を参照。RES.I&RES.IIとは Research University I &IIである。DOC.I&IIとは Doctoral University I&IIである。上記4クラスの大学は研究レベルが高く博士課程の教育が充実している。LA I&IIとは Liberal Arts Colleges I&IIであるが、現在の分類では Baccalaureate (Liberal Arts) Colleges I&IIであり、これらに属する大学は学部レベルの教育が主である。
- 9) The Chronicle of Higher Education (<http://chronicle.com/>) Tomorrow's professor Listserv (<http://sll.stanford.edu/projects/tomprof/newtomprof/postings.html>)
- 10) 平成13年「我が国の研究活動の

実態に関する調査報告」(平成14年9月発表)、文部科学省 科学技術・学術政策局 調査調整課。

- 11) 科学分野の博士号取得者の平均給料は、Science and Engineering Indicators 2002, National Science Foundationを参照にした。
- 12) 科研費の配分状況は、日本学術振興会のHPを参照した。(http:

//www.jsps.go.jp/j-grantsinaid/)

- 13) 大学の教員数は、文部科学省生涯学習政策局調査企画課による「平成13年度学校教員統計調査中間報告(平成14年9月発表)」を参照した。統計は平成13年10月1日現在の数値である。
- 14) 博士号をもつ米国の常勤若手教員(Full-time junior faculty)数

は、Science and Engineering Indicators 2002, National Science Foundationによる。博士号の分野は、Mathematics, Computer sciences, Earth, atmospheric, and ocean sciences, Life sciences, Psychology, Social sciences, Engineeringである。

.....

## 特集②

## ドラッグデリバリーシステム (DDS) の研究開発動向

客員研究官 丸山 典夫\*  
材料・製造技術ユニット 多田 国<sup>\*</sup>



## 1. はじめに

病気を抱える人に、その対症療法として外科的な手術あるいは薬物療法による治療が行われている。これまで薬物は定期的な服用や筋肉および静脈への注射によって全身へ投与されている。注射による投与は疼痛や組織傷害を引き起こすことがあり、経口投与は性別、年齢および病状など個体差に応じた投与が困難である。また、投与された薬物は患部のみでなく正常細胞（組織）にも分布し、肝臓の代謝などにより減少する。このため、投与量のごく一部しか患部に達して作用せず、正常細胞に分散した薬物は、副作用の原因となる。そのため、薬物の1回の服用や注射だけでは長時間有効な血中濃度を維持できず、必要量よりはるかに多くの量を繰り返し投与しなければならない。

近年、薬物の過剰投与および副作用を抑制して、より安全に、効

果的に薬物投与を行う手段として、“必要最小限の薬物を、必要な場所に、必要なときに供給する”ドラッグデリバリーシステム（Drug Delivery System, DDS）の研究が活発に行われている。DDSには薬物を体内でゆっくり溶かすことを目的とする方法と血流に乗せて目的とする患部まで薬物を送る方法がある。これらの方法の実用化には、薬物の改良だけでは困難であり、薬物を担持する高分子材料あるいは無機材料などマトリックス材料の開発が必要となる。また、薬物を血流に乗せて患部の毛細血管まで運ぶ場合、毛細血管の直径は約5  $\mu\text{m}$ であること、薬物の吸収性は薬の粒子径が小さいほど高いことを考えると、薬物とマトリックス材料を含めた大きさを数nmから最大でも200 nm（1 nmは10億分の1 m）にする必要がある<sup>1)</sup>。

がんおよび再生医療などを対象としたDDSについては、薬物を担持する高分子ミセルあるいはリポソームなどを利用する研究が著しく発展し、数々の臨床試験が行われている。消化器系を対象とした生体内診断・治療およびDDSについて、実用可能なMEMSが開発されている。このように現在DDSの研究開発は大きく実を結ぼうとしている。さらに、DDSは厚生労働省の科学技術政策において「先端科学技術の開発と応用」（ナノメディシンプロジェクト）で取り上げられるなど、研究開発において大きく飛躍する時期を迎えている。

そこで、本報告では、DDS研究開発の現状を紹介するとともに、将来のDDS像を考え、そのための研究開発の必要性および研究体制の整備の必要性を論じる。

## 2. DDSにより期待される効果

治療および医薬品開発の立場からDDS技術によってもたらされる効果として次のような効果が期待される<sup>2)</sup>。

- ①特定の作用だけを取り出すことや、特定の作用の発現を抑え込むことができる。（作用の分離）
- ②効果がよりの確なものとな

り、投与量の削減や適用拡大が期待できる。（効果の増大）

- ③副作用のためドロップアウトした化合物を薬として蘇らせることもできる。（副作用の軽減、安全性の増大）
- ④医療従事者や患者の負担が軽減し時間的ゆとりの解消になる。（使用性の改善）
- ⑤製品のライフサイクル延長、

医療費の軽減が可能となる。（経済性）

また、DDSの研究開発は生体メカニズムの理解の深まりと材料設計技術の高まった結果、新しい治療法である遺伝子治療、再生医療およびゲノム製剤の利用においても、より効果的に、より安全に治療できることが期待されている。



### 3. これまでのDDS

DDSには図表1<sup>3)</sup>に示すようなさまざまな仕組みが考えられ、いくつかのDDSが実用の段階に到達している。DDSを考える上で薬剤を担持する材料が重要であり、特に血中投与の場合薬物を担持する材料には次の特性が必要とされる。

- ①小さな粒径(100 nm)で大きな薬物容量。
- ②高い水溶性。
- ③高い構造安定性。
- ④役割を果たした後の、生分解性、生体吸収性。

このような特性を兼ね備えた高分子あるいは無機材料が開発され、以下に紹介するDDSが現在までに実用化されている。DDSは大きく分けて薬物を一定期間にわたって一定速度で放出する徐放化（薬物の徐放化）と目的とする患部に選択的に輸送するターゲッティング（薬物のターゲッティング）に分類できる。

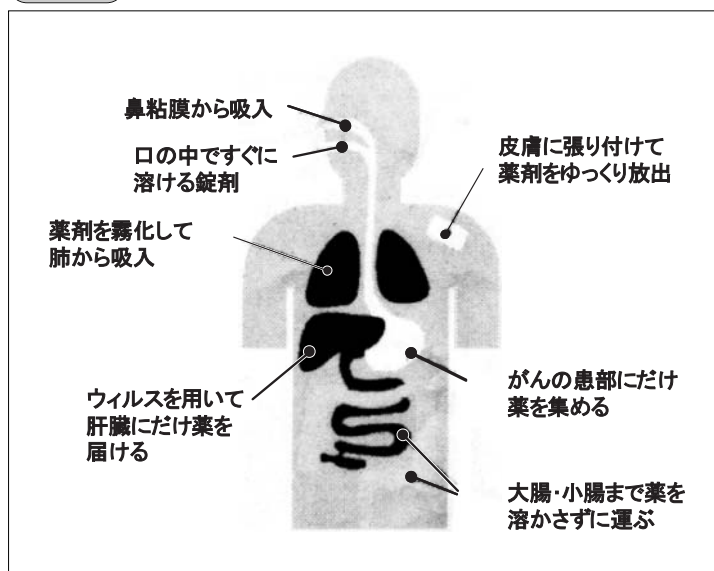
#### (1)薬物の徐放化

薬物徐放の目的は薬物の血中濃度を長期間一定に保つことである。薬物徐放の基本原理には、図表2に示すようなリザーバー型と、モノリシック型がある。

リザーバー型は薬物を包んでいいる高分子膜の薬物透過性により透過量を制御する方法であり、モノリシック型は薬物を高分子あるいは無機物マトリックス中に分散させることにより薬物の拡散を制御する方法である。

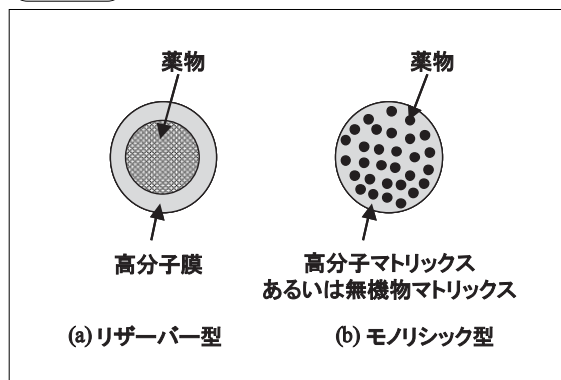
通常の方法で投与された薬物の血中濃度は、時間とともに投与回数に応じて、図表3に示すようにのがざり刃状に変化する。薬物を投与した直後には血中濃度が急激に高まり、場合によっては薬物の副作用の危険性がある濃度にまで

図表1 さまざまなDDSの仕組み



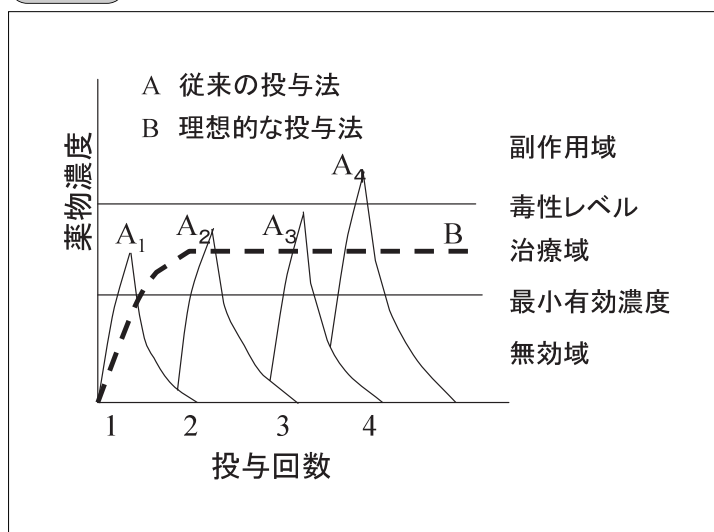
(日経ホームページ <http://www.nikkei4946.com/today/0105/12.html>)

図表2 薬物徐放の基本メカニズム



(科学技術動向研究センター作成)

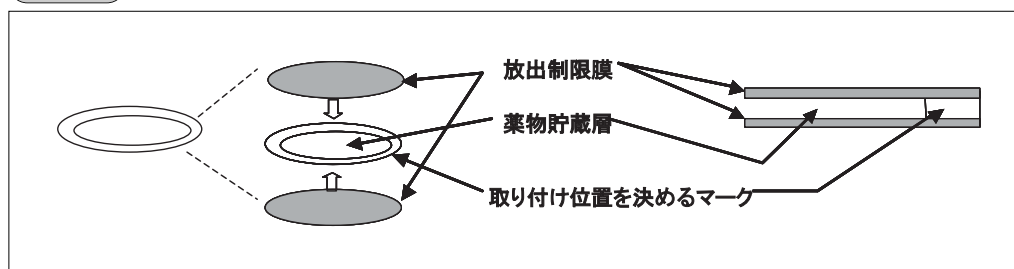
図表3 薬物の血中濃度の時間的変化



(科学技術動向研究センター作成)



図表4 Ocusart システム (緑内障治療)



(科学技術動向研究センター作成)

達する。一方、血中の薬物は各組織で代謝され、また排泄などにより濃度は減少する。必要最低限の濃度を下回ってしまうと治療効果は全くなってしまう<sup>4)</sup>。

T. Higuchi (ユタ大学) と A. Zaffaroni (Alza 社) らは、図表4に示すように緑内障の治療薬である Pilocarpine をエチレン-酢酸ビニル共重合体(EVA)に包含させ、それをコンタクトレンズのように装着すると薬物の効果が4日から7日持続できる Ocusert システムを1974年実用化させ、日本では1981年に上市された。このシステムの売上高は全世界で年間600億円以上である。その他に貼り薬のように皮膚からの吸収を制御する PEVA 膜に取り組んだ経皮吸収システム (Transdermal Therapeutic System, TTS) である狭心症薬のニトログリセリンや高血圧症薬のクロニジン (Catapres-TTS) などが1989年に実用化されている。さらに、最近では禁煙を助けるような TTS (ニコチネル TTS) も1998年に実用化されている。このタイプの DDS は副作用などの不都合が生じた場合、簡単に使用を中止することができるなどの利点があるため、実用化まで急速に進んだものと思われる。

前立腺がん治療薬として武田薬品は4週間薬物の血中濃度を保持することができるリュープリンを1992年に実用化した。それは、世界70カ国以上で使用され、年間売り上げは1500億円以上にのぼる。さらに、薬物を封入する材料

を替えることにより12週間薬物の血中濃度を保持することができるリュープリンSR注射キット11.25が2002年8月に実用化された<sup>5)</sup>。

糖尿病患者はインスリン注射を毎日数回余儀なくされている。しかし、1953年にノボ社 (デンマーク) の易溶性と難溶性2種類のインスリン結晶を混合することにより、注射の回数を1日1回にすることが可能となった。インスリンの場合、過剰に投与されて血中グルコース濃度が低くなりすぎると脳に機能障害を起こすなど生命が極めて危険な状態 (低血糖症) となるため、グルコース濃度に応じて適量のインスリン投与を行う必要がある。そのために、血中グルコース濃度に応じてインスリンを放出する材料およびシステムの研究開発がなされているが、実用化には至っていない<sup>4)</sup>。

## (2) 薬物のターゲッティング

薬物のターゲッティングはミサイル療法ともいわれ、炎症部位やがん細胞などを標的として薬物を効率よく送って薬効を発揮させる方法である。水島裕 (東京慈恵会医科大学・DDS 研究所) は、多重構造の人工リン脂質膜内部に薬物を封じ込めた微粒子 (リポソーム) を用いたリポ製剤を1988年に開発した。これは世界初のターゲッティング製剤として注目された。リポ製剤は脂肪の微粒子が動脈硬化の起きている血管や炎症部位によく集まる性質を利用してお

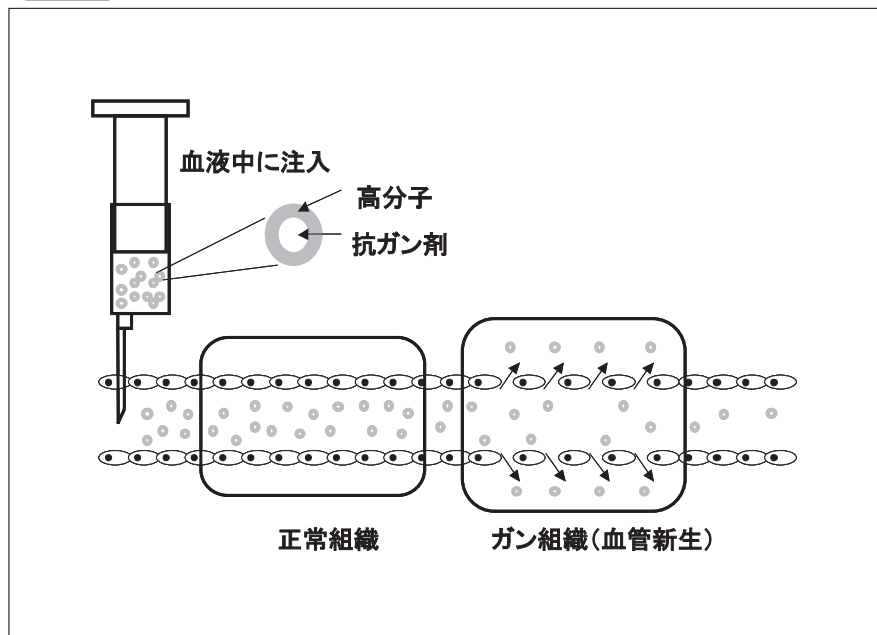
り、脂肪微粒子の中に動脈硬化によく効くプロスタグランジン E<sub>1</sub> (PGE<sub>1</sub>) を封入したリポ PGE<sub>1</sub> 製剤 (第1世代) が実用化された。1992年以降最近まで我が国での、年間売上高は約350億円を維持している。PGE<sub>1</sub> 製剤は薬物を大豆油中に封入し、表面をレシチンにより被覆したものである。上記製剤以外にステロイドホルモン、非ステロイド性鎮痛消炎剤が実用化されている。現在、PGE<sub>1</sub> をエステル化した第2世代の PGE<sub>1</sub> 製剤に関して、三菱ウェルファーマ (株) が米国および日本国内において、臨床第2相および第3相試験中である<sup>6)</sup>。

一方、がん細胞への薬物のターゲッティングの研究開発は、これまでがん細胞との抗原-抗体反応を利用し抗がん剤ががんを集積させようとするアクティブターゲッティングの原理に基づいて行われてきた。実験室レベルでにおいて一定の成果が得られているが、動物実験においては成功していない。それは、目標とするがん抗原に類似の抗原が血液中小および他の正常細胞表面に存在するので、目標部位に必要な量の薬物を集中できないためである。

1986年に前田浩 (熊本大学大学院医学研究科) らによって EPR 効果 (Enhanced Permeation and Retention effect) が提唱されてからは、固形がんに対するターゲッティング研究は大きく変化した。図表5に示すようにがん組織にある新生血管は正常組織の血管に比

べて物質透過性が高いため、分子サイズの大きな高分子化合物がより多くがん組織に透過・移行する。さらに、がん組織ではリンパ管による高分子化合物の回収機構が不完全なため、高分子化合物はがん組織内に滞留し易い<sup>7)</sup>。これをEPR効果という。本効果により、がん細胞に血中の薬物を取り込ませるパッシブターゲッティングが行えるようになった。これにより、1986年以降の固形がんに対するターゲッティングは、それまでの抗原-抗体反応によるアクティブターゲッティングに対し、肝臓、腎臓での代謝を抑えることおよび徐放を利用したパッシブターゲッティングとして新たなスタートをきった。

図表5 抗がん剤の固形がん部位への選択的デリバリー（EPR効果）



（科学技術動向研究センター作成）

## 4. 現在のDDSの研究開発状況

先に述べたように、これまでのDDSの研究開発は薬物の徐放と目的とする患部へのターゲッティングに分けられ、それぞれ個別に行われてきたと考えられる。しかし、固形がんのターゲッティングにおいてEPR効果が提唱されてから、単なるがん細胞へのターゲッティングのみでなく徐放機能を伴ったシステムの研究開発が行われるようになった。

### 4-1

#### 我が国のDDSの研究開発状況

##### (1)がん細胞へのターゲッティング

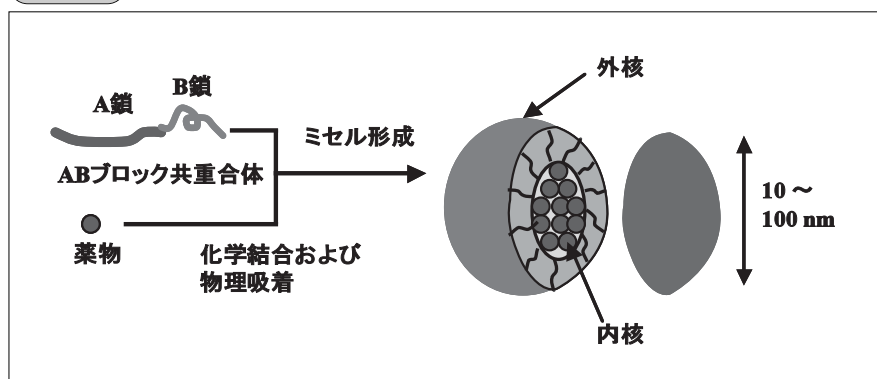
片岡一則（東京大学大学院工学研究科 併任 物質・材料研究機構生体材料研究センター）らは、抗がん剤のアドレマイシンを内包した高分子ミセルを用いて生体内での抗がん活性の著しい増進を得、がん組織への選択性の高い集積を確認している。これは、図表6に示すようにアドレマイシンをA鎖にポリエチレングリコー

ル、B鎖にポリアスパラギン酸を用いたブロック共重合体のB鎖部分に化学的に結合させて、A鎖を外殻とする直径数十nmの粒子径の揃った高分子ミセル（集合体）を形成させ、その内核にもアドレマイシンを物理的にも吸着させたものである。

ヒトの大腸がん細胞を移植したマウスにアドレマイシンを内包した高分子ミセルを含む水溶液を投与すると、EPR効果によりがん細胞でのアドレマイシンの集積度はアドレマイシンだけを投与

した場合の集積度に比べ十数倍と高く、高い制がん効果を確認している。現在、臨床第1相試験が進行しており、固形がんへのターゲッティングDDSとして高く期待されている。さらに、高分子ミセルのシステムは、シスプラチンや他の難水溶性抗がん剤にも容易に適用できる汎用性の高いシステムである。本システムは治療用タンパク質をコードしている遺伝子をミセルに内包し、目的とする細胞内に効率よく運搬する遺伝子治療材料としても研究されている。

図表6 薬物を内包した高分子ミセル



（科学技術動向研究センター作成）

## (2)再生医療への応用

血液細胞以外のほとんどの細胞は、生体内では細胞外マトリックスと呼ばれる増殖・分化のための足場材料に接着している。生体組織が大きく欠損した場合、この足場も失われるため、欠損部に細胞のみを補填しても組織の再生は望めない。そこで、組織を再生させるためには、欠損部において細胞の仮の足場を提供するとともに、その細胞を増殖させるための細胞増殖因子を用いる必要がある。しかしながら、細胞増殖因子はタンパク質であり、生体内での寿命は短く不安定である。これらのことを解決する方法として、生体吸収性材料に細胞増殖因子あるいはその関連遺伝子を内包させ、再生部位で徐放化すれば組織の再生が促進されることが考えられている。DDSを利用した再生医療の研究は活発に行われており、ここではその一部を紹介する。

- ①生体吸収性高分子ハイドロゲルを用いた細胞成長因子の徐放化  
ゼラチンやコラーゲンあるいはヒアルロン酸、アルギン酸などの高分子混合物を架橋することによりハイドロゲルを作製し、細胞成長因子の水溶液を凍結乾燥高分子ハイドロゲル内に

固定化する手法である。生体内でハイドロゲルは時間とともに分解するが、その分解速度はハイドロゲルの架橋の程度によってコントロールできる。

田端泰彦（京都大学再生医科学研究所）らは、生体内に毒性の小さい生体吸収性ゼラチンハイドロゲルを利用した細胞増殖因子の徐放化の研究を進めている。血管新生因子の1つである塩基性繊維芽細胞増殖因子（basic fibroblast growth factor, bFGF）をゼラチンハイドロゲルから徐放することにより、血管新生を誘起することができると考えている。心臓の冠動脈の再生を試みるため、イヌの心臓の左前下行枝分岐部を結紮した

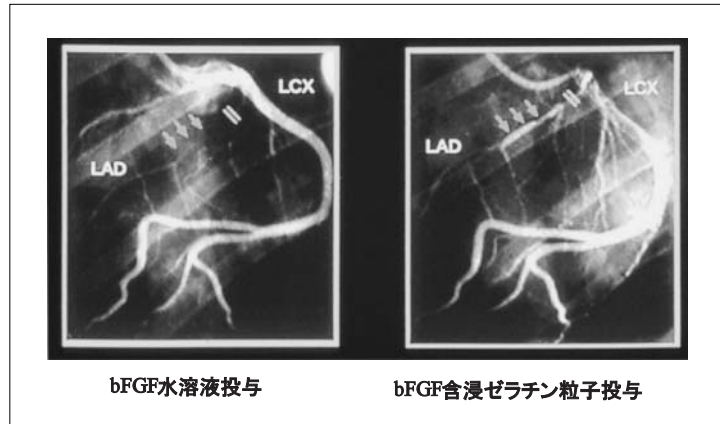
1週間後にbFGF含浸ゼラチンハイドロゲル粒子を投与すると、図表7<sup>8)</sup>に示すように投与1週間後に心筋内で血流の再開があり、血管新生が起きていることが確認されている。この手法は虚血疾患あるいは移植細胞への酸素および栄養を供給し、機能維持のために極めて有用な手法である<sup>9)</sup>。

- ②生体吸収性無機材料を用いた細胞成長因子の徐放化

水島裕、田中順三（物質・材料研究機構生体材料研究センター）らは、リン酸カルシウムや炭酸カルシウムのような生体内の硬組織中に存在する材料を用いた再生医療用の担体材料の開発を行っている。これらは生体内で薬物を徐放した後に、担体が生体内で溶解し、かつ溶解後に生体内に毒性を示さないことが特徴である。炭酸カルシウムを用いた製剤ではステロイドホルモンや塩基性タンパク質の徐放に成功している。

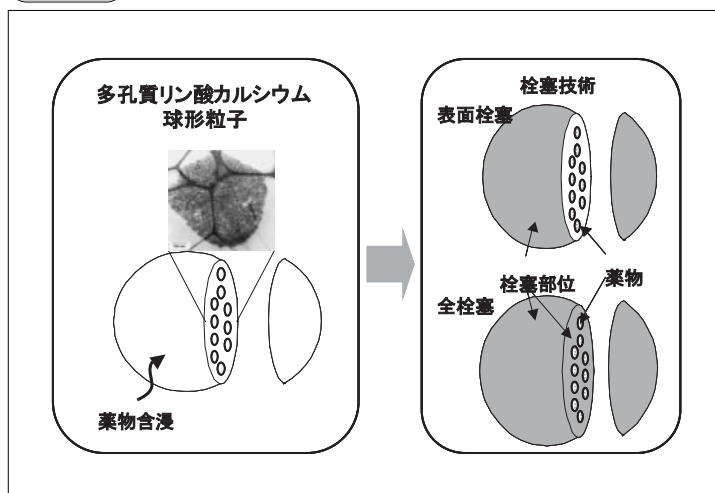
さらに、近年、生体硬組織（特に骨）に存在するアパタイト微粒子（1～10 μm）多孔体への薬物徐放（栓塞）技術を開発している。これは図表8に示すようにリン酸カルシウム微粒子多孔体中に薬物を封入した後、表面および内部の孔を多糖

図表7 bFGF含浸ゼラチン粒子の心冠動脈に対する効果



（京都大学再生医科学研究所 生体組織工学研究部門 生体材料学分野 田畑研究室ホームページ <http://www.frontier.kyoto-u.ac.jp/te02/studies/research/heart.html>）

図表8 無機材料を用いた徐放システム



（科学技術動向研究センター作成）



類や炭酸カルシウムなどの生体毒性のない材料で塞ぎ、徐放性を高めたものである。皮下および筋中でのタンパク質製剤の徐放、局所投与、局所滞留性徐放などの再生医療用薬剤への応用が可能である。赤血球を増加させるエリスロポエチンや脳の線条体ニューロンの生存に必須な脳由来神経栄養因子の2週間にわたる徐放などに成功している。これらの製剤はリン酸カルシウムの優れたタンパク質吸着特性に着目した製剤であり、今後数多くのタンパク質製剤への応用が期待されている。

### (3) 遺伝子治療への応用

現在、遺伝子治療において多くの場合、遺伝子導入剤（運び役）として無毒化したウイルスが用いられている。しかし、ウイルスの毒性を完全にとり除けなかったり、ウイルスが後から突然変異を起こして毒性を獲得する場合がある。このようなことから非ウイルス性遺伝子導入剤の研究開発が進められている。

片岡一則らは遺伝子を取り込んだリン酸カルシウムの周りを、生体になじみやすいポリエチレングリコールを主成分とする高分子で覆った非ウイルス性遺伝子導入剤を開発している。これをヒトの培

養細胞と一緒に混ぜ合わせると遺伝子導入剤は自然に細胞に取り込まれる。カルシウム濃度が低い細胞内において、取り込まれた遺伝子導入剤からリン酸カルシウムが溶けだし、遺伝子を放出することが期待できる。試験管実験でこの遺伝子導入剤は細胞に遺伝子を導入することができ、細胞に対する毒性がないことも確認されている。今後マウスなどの動物実験を始める予定である。

中西真人（産業技術総合研究所 ジーンファンクション研究ラボ）らは、センダイウイルスの膜融合活性を利用した膜融合リポソームにより、ヒトの遺伝子治療に必要な新しい遺伝子導入系を開発することを目指している。センダイウイルスは宿主細胞を殺すことなく、非常に安定に感染を続けることができる性質を持っている。そのセンダイウイルスを使って作られた膜融合リポソームは、その外膜がセンダイウイルス由来で、細胞膜に直接融合するためにその内部の物質を細胞に送り込むことができる。

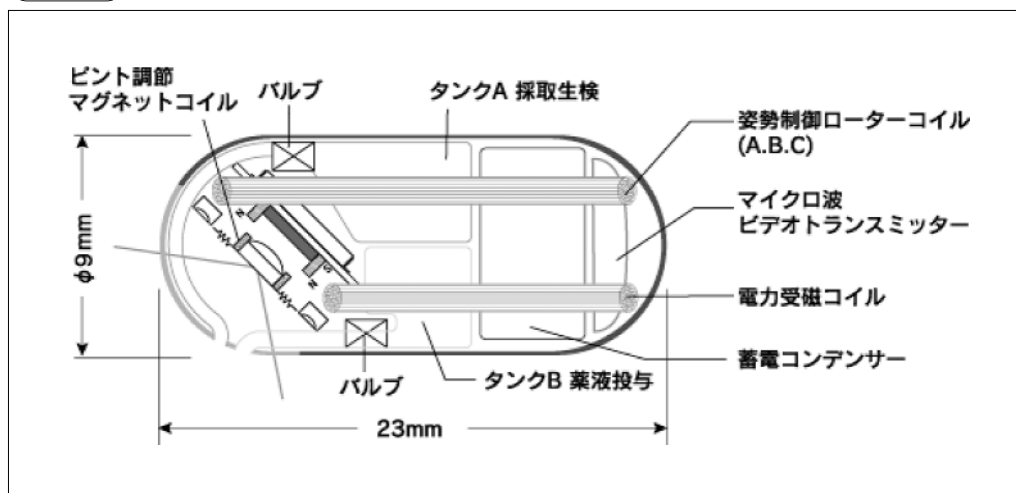
### (4) 薬物ターゲティング MEMS

MEMS（Micro Electro-Mechanical Systems）を用いた薬物のターゲティングに関しては、図表9に示すような「ロボット潜水艇

が体内に入り診断と治療を行う」というキャッチフレーズで、カプセル型のバッテリーレスの消化器系内視鏡「NORIKAv3」<sup>10)</sup> が医療用カメラメーカーのアールエフ社（日本）によって2002年秋発表された。NORIKAv3は図に示すように、 $9\phi \times 23\text{ mm}$ のカプセルに電力受磁コイル、蓄電コンデンサーを内蔵し、患者の体外から電波でカプセルおよびカメラの駆動制御を行うことができる。撮影イメージセンサーにCCD素子を採用し、白色と赤外線ライトに加えて波長の異なる照明を組み合わせることにより、ホームビデオ並の高画質の動画を観察することができる。さらに、カプセル内に全体積の40%を占める2つのタンクが装備されており、専用のバルブ制御により任意の位置で薬液を投与することができ、消化器系のDDSとしての機能も持っている。NORIKAv3は、カプセルの価格が100米ドル、体外コントロール装置が1万ドル程度で販売される予定である。2002年12月には臨床試験に向けてサンプル出荷される。

一方、循環器系を対象とするMEMSに関しては、毛細血管の直径が $5\text{ }\mu\text{ m}$ と細いため、MEMSの大きさは数百nmでなければならない。このようなサイズのMEMSを作製することは現在の

図表9 消化器系 MEMS



（アールエフ株式会社ホームページ <http://www.RFNORIKA.com/index1.html>）

ナノテクノロジーを駆使しても困難であると考えられる。そこで、ナノ構造体の形態変化を利用したナノマシンをリポソームや高分子ミセルなどに修飾することで薬物ターゲティングナノマシンとする研究がなされている。この場合、薬物放出を制御するバルブが分子の形態変化などにより開閉することなどが考えられている。

#### 4 - 2

### 欧米のDDSの研究開発状況

DDSの研究開発は、欧米においても日本と同様にがん治療、遺伝子治療、再生医療およびエイズ治療への応用を目指して活発に進められている。各国のDDSの研究においても、用いられている高分子構造は、ミセル、デンドリマー（樹状構造）およびリポソームなどである。これらの高分子構造は他の構造に比べ多量の薬剤を運搬することができるという特徴がある。高分子構造と薬物の組み合わせによって目的とする患部へのターゲティングおよび徐放の研究が行われている。例として次のようなものがあげられる<sup>11)</sup>。

#### (1)がん細胞へのターゲティング

- 英国の R. Duncan (Cardiff Univ.) らは、ポリエチレングリコールおよびN-(2-ヒドロキシプロピル)メタクリル

(親水性ポリマー)に抗がん剤をペプチド結合させ、血液中を24時間循環するようにして、固形がんおよび転移性がん組織への抗がん剤を開発している。

- 米国の James R. Baker Jr. (Univ. of Michigan), Jean M. J. Frechet (Univ. of California, Berkeley) らは、数nmと粒子径が小さいためより組織に到達しやすい考えられているデンドリマー（樹状構造）に、抗がん剤のシスプラチンやメソトキセートを結合させての使用をすでに検討している。
- 米国の Glen. S. Kwon (Univ. of Wisconsin) らは、ポリエチレングリコール-ポリ(L-アスパラギン酸アミド)の直径30-50 nmのミセルと抗エイズ薬剤アンフォラリシンBとの組み合わせによって、エイズ治療への使用を検討している。

#### (2)再生医療への応用

- スイス工科大学の Jeffrey A. Hubbell (ETH) らは、フィブリンのように生体内で液体からゲル化する材料を用い、その中に細胞の増殖に必要な因子(VEGFなど)を取り込むことにより、血管新生、骨再生および神経再生などの再生医療への応用を検討している。

#### (3)遺伝子治療への応用

- 英国の Alexander T. Florence (Univ. of London) らは、デンドリソームやデンドリプレックスなどのデンドリマー凝集体（複合体）を作り、DNAを結合させ遺伝子導入剤としての応用を試みている。

#### (4)薬物ターゲティングMEMS

- イスラエルのギブニイメージ社は、電池駆動式のカプセルカメラ「M2A」を2002年5月に発表した。しかし、画像解像度、電池の寿命およびカプセルが体内に残留した場合、電池の化学物質の影響などいくつかの指摘を受け、それを解決するには数年かかるかとされている。

上述のように、欧米においてもDDSに関する研究開発は広範囲に活発に行われている。我が国のDDS研究開発の一般的評価は、DDSの概念が生まれた1950年代頃においては、新薬の開発に対する評価の方が高く、DDSに対しての評価が適切になされなかった。そのためDDS研究開発の水準は欧米と比較して一步遅れていた。しかし、新規なDDSに対する評価が広く認められるようになった1980年代以降著しい発展がみられ、現在では欧米に劣ることなく、同等あるいはそれ以上の水準と思われる。

## 5. 国の取り組み

1980年代から1990年代においてDDSの研究開発は、主に文部省科学研究費補助金(科研費)で行われていた。なかでも1982年から6年間特定研究(鶴田禎二:東京大学名誉教授)らによってDDS用の材料研究開発が行われた。さらに1999年度から3年間「特定領域研究(A)」、「バイオターゲットングのための生体分子

デザイン」(領域代表者小林猛:名古屋大学大学院工学研究科)において、ターゲティング機能を化学的視点からとらえ、工学的に構築し直す研究が行われた。

2002年度の厚生労働省における科学技術政策の研究課題「先端科学技術の開発と応用(ナノテクを医療に応用するナノメディスンプロジェクト)」において取り上げ

られている。ナノテクノロジーの医療分野への応用として循環器疾患などの病体の解明や細胞レセプターの機能解明によるDDS開発、ナノデバイスの医療分野への応用として小型精密治療機器の研究開発が国際競争力強化の観点からも重要なものとして進められている。

科学技術振興事業団では戦略的創造研究推進事業(CREST)の

研究領域「化学・生物系の新材料等の創製」において、「ナノスケールでの化学や生物系の革新的な機能材料、分子機械、バイオ素子、バイオセンサ技術の創製を目指して」（研究総括相澤益男；東京工業大学）の一環として平成13年度に「遺伝子ベクターとして機能するナノ構造デバイスの創製」が片岡一則らによって提案され取り上げられている。この研究は、遺伝子を始めとする様々な医薬品を体内の狙った組織に運び、治療や診断を行う安全で高機能の「遺伝子ベクター」を、合成高分子や脂質分子の的確な自己組織化に基づいて作り出すことを目的としている。

さらに、平成14年度においても「ソフトナノマシンの高次機能構造体の構築と利用」（研究総括宝谷紘一；名古屋大学大学院理学研究科）において原口徳子（独立行政法人通信総合研究所）らの提案「遺伝子デリバリーシステムとしての人工細胞核の創製」が取り上げられている。この研究は、染色体の周りに核膜が形成される機構を明らかにし、この原理を利用して特殊機能を持った人工細胞核を創ることにより、遺伝子治療や薬物投与などに役に立つ特殊機能を持った遺伝子デリバリーシステムの開発を目指している。

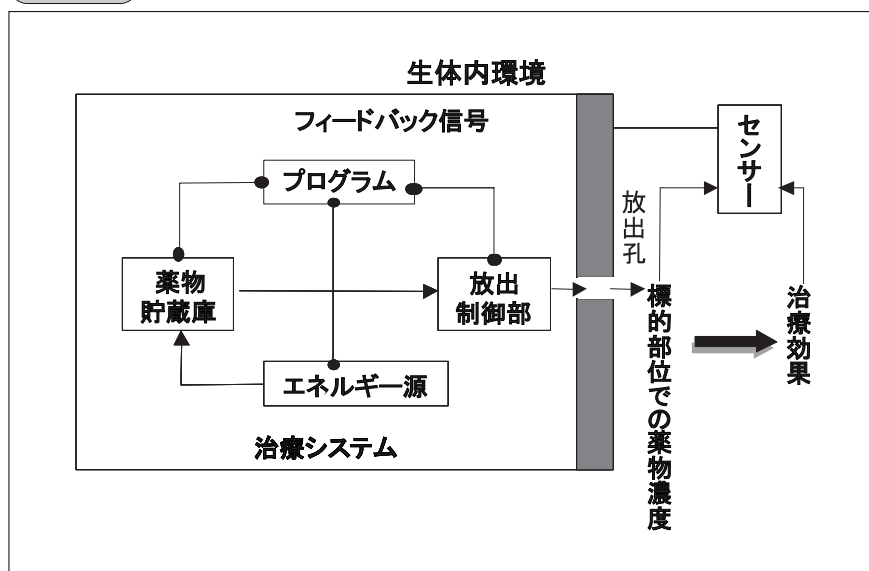
また、独立行政法人物質・材料

研究機構では、高度医療社会の実現を目指して平成13年10月に生体材料研究センターが発足した。同センターでは、DDSに関しても、高分子ミセル構造のがんへのターゲティングおよび遺伝子治療への応用、無機材料の再生医療への応用を考えた研究開発を行うなど、幅広く総合的に生体材料の研究開発を行っている。現在、工学系20大学（海外4）、医学系15大学（海外2）および企業15社（海外2）との共同研究を進めており、日本の生体材料研究開発の中心的拠点となることを目指している<sup>12)</sup>。

## 6. 将来のDDS像

将来のDDSに望まれることは、生体内での薬物の移行や反応を患者の個体差に応じ、どれだけの量を、どの様な速さで、どこで、いつ薬物を放出するかを制御することである。例えば、糖尿病治療の場合、先に述べたように血中のグルコース濃度に応じてインスリンを放出する必要がある。そのための理想的な薬物制御放出システムとして図表10に示すようなシステムが考えられている。その実現には次のような機能を併せ持つ必要がある。

図表10 理想的な薬物制御放出システム



（科学技術動向研究センター作成）

- ①治療効果および薬物濃度に対するセンシング機能（センサー開発）
- ②情報処理、放出パターンを設定できる機能（情報処理開発）
- ③上記設定に基づく精密放出機能（精密放出装置開発）

これら①から③の機能を保持する材料の信頼性・安全性が保たれることも必要条件である。

そのためには薬物と組み合わせ

る高分子および無機材料などの材料科学の研究開発が重要であることはもちろん、センシング機能や微量分析、精密機械工学などの発展が必要となり、次のような研究開発の取り組みが考えられる。

- ナノ構造体の形態変化を利用したナノマシンをリポソームや高分子ミセルなどに、薬物

およびセンシング機能をもつタンパク質などを修飾し、分子の形態変化によるバルブを伴うターゲティング用ナノマシンの開発研究。

- センシング機能、情報処理および精密放出装置を伴う薬物放出MEMSの研究開発。

## 7. DDS製剤の審査の現状

厚生労働省における「DDS製剤の審査」についてはあまり検討されていない。「DDS製剤の審査」の現状は下記の通りである<sup>13)</sup>。

- 平成11年4月の局長通知では、新有効成分、新配合剤、新投与経路、新効能、新剤形、新用量の規定はあるが、特にDDS製剤について定めたものはない。
- DDS製剤にもっとも関連があると思われる新剤形については、毒性試験、薬効薬理・一般薬理試験が不要となっているが、すぐれたアイデア・

技術により効果が著しくなったDDS製剤の場合、これらの試験は必要である。

- DDS製剤の後発品に関して、製剤成分が異なっている場合でも、通常の後発品と同じように審査・認可されている。
- 徐放製剤の評価のガイドラインは昭和63年にだされているが、以降検討されていない。

などである。

このような背景から日本DDS学会は1999年7月に「DDS製剤審査のガイドライン案」を厚生省に提出した。このガイドラインは

DDS製剤の特徴をよく把握し、論理的に必要な基礎・臨床試験は十分行うことはもちろん、不必要なものは省略して審査期間を短縮することを示すものである<sup>13)</sup>。

現実問題として製薬メーカーが開発した新薬に関しては、我が国における新薬の審査期間が長いため、欧米で審査を経て逆輸入する場合もある。我が国の新薬の審査期間が長いことが製薬の実用化を遅らせ、さらには医療産業競争力が欧米に比べて低い原因となっていると思われる。

## 8. おわりに

これまで述べたようにDDSの研究開発は、徐放型では容易に開発可能なものはほぼ出そろい実用化されている。これまで停滞していたがん細胞などへのターゲティングに関して、最近飛躍的に発展しており、その成果が臨床応用されるに至っている。再生医療や遺伝子医療においては、遺伝子のみならず細胞までもが薬物と考えられ、目的とする患部までこれらを運ぶシステムが求められている。また、消化器系のDDSとして使用することが可能なMEMSが開発された。このような状況の中、厚生労働省における科学技術政策の研究課題（ナノテクを医療に応用するナノメディシンプロジェクト）や科学技術振興事業団の戦略的創造研究推進事業においてもDDSに関するプロジェクトが取り上げられ進められている。さらに、2002年11月に(社)日本経済団体連合会が公表した「ナノテクが創る新産業」—n-Plan2002—の中で、今後発展が期待されるナノ医療分野において我が国の高い技

術競争力を維持するためには、国がナノ医療分野の研究開発を進めるとともに医療関連制度の見直しと迅速な運用などの環境整備、医工連携に取り組むべきであると提言されている。

DDSの研究開発は、学際領域であるため、医学、薬学、材料科学、生物工学、精密機械工学、電子工学、情報科学などの連携が必要である。このような幅広い分野の連携は、一企業、一大学、一研究所では達成が期待できない。したがって、できるだけ早い時期に連携の中心となる組織を国の強い主導で構築し、優れた研究者のもとで、環境・体制を整えDDSの研究開発を産学官の共同で進め、日本の高い技術競争力レベルを維持・発展させることが必要である。こうした状況の中で、「バイオテクノロジー戦略会議」の大綱案は、バイオ研究費の増額（5年で倍増）、新薬審査期間の短縮などの規制緩和をすることを提示した。この大綱案はDDS研究開発を促進する上でも重要な政策である。

## 謝 辞

本稿をまとめるに当たって、片岡一則教授（東京大学大学院工学研究科 併任 物質・材料研究機構生体材料研究センター）には、ご指導をいただくとともに、最新の情報を提供していただきました。ここに深甚な感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 「21世紀を切り開く先端医療」東京女子医科大学医用工学研究施設 編、ニュートン プレス (1999) .
- 2) 月刊薬事 Vol.44.No4. (2002) .
- 3) 日経ホームページ <http://www.nikkei4946.com/today/0105/12.html>
- 4) 「バイオマテリアル」中林宣男、石原一彦、岩さき泰彦共著、コロナ社、(1999) .
- 5) 武田薬品工業株式会社ホームページ <http://www.takeda.co.jp/press/02083001j.htm>
- 6) 株式会社LTT研究所ホームペー

- ジ <http://www.ltt.co.jp/index.html>
- 7) 東京女子医科大学先端医科学研究所ホームページ <http://www.twmu.ac.jp/LAB/r-10.htm>
- 8) 京都大学再生医科学研究所 生体組織工学研究部門 生体材料学分野 田畑研究室 ホームページ <http://www.frontier.kyoto-u.ac.jp/te02/studies/research/heart.html>
- 9) 「再生医工学」筏 義人編 (化学同人), (2001)
- 10) アールエフ株式会社ホームページ <http://www.RFNORIKA.com/index1.html>
- 11) CHEMICAL&Engineering News, Vol.80 No34 (2002) .
- 12) 独立行政法人物質・材料研究機構生体材料研究センター <http://www.nims.go.jp/>
- 13) Drug Delivery System No1 (2000).

.....



## 特集3

## 光触媒利用技術の現状と展望

客員研究官 羽田 肇\*

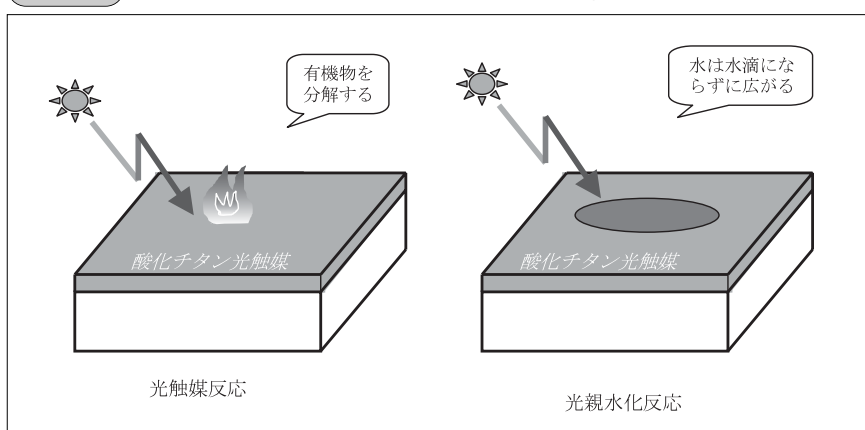
材料・製造技術ユニット 多田 国之



## 1. はじめに

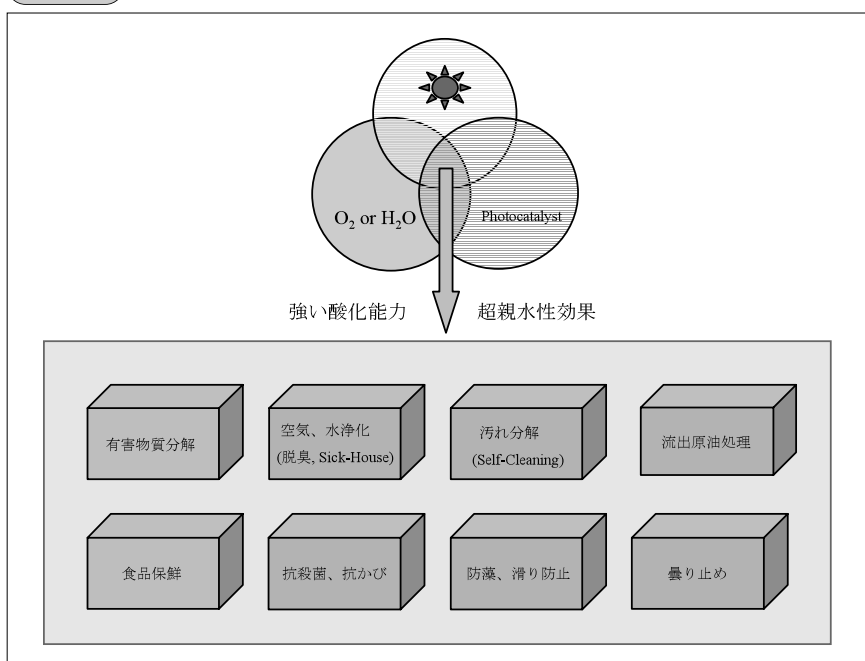
光触媒 (Photocatalyst) は、光のエネルギーによって働く触媒である。即ち、光触媒は光を吸収して高いエネルギー状態となり、そのエネルギーを反応物質に与えて化学反応を起こす。この作用は光触媒作用 (Photocatalysis) と呼ばれる。光触媒作用術語の出現は1930年代に遡る<sup>1)</sup>。1950年代、この光触媒作用は塗料に含まれている顔料による塗料の劣化（いわゆるチョーキング現象）の原因として知られた。従って、当時、顔料による塗料の劣化などの光触媒反応を抑えるため、いろいろな研究が行われていた。すなわち光触媒作用は長い間マイナスのイメージで捉えられてきた<sup>2)</sup>。1960年代、酸化亜鉛粉末を用いた光触媒反応による有機化合物の反応がいくつかのグループで研究された<sup>3)</sup>。しかし、酸化亜鉛はそのもの自身が光溶解するという欠点を有しており、それほど多くの注目を集めるまでには至らなかった。1970年代に入り、本田・藤島らにより、酸化チタン電極に光を照射することにより水素発生が促進されることが見出された<sup>4)</sup>。この現象は現在ホンダ・フジシマ効果と呼ばれる。このことをきっかけに、この分野は急速に発展し、光触媒研究のブームが到来した。1980年代には、有害物質分解にも応用できることが判明した<sup>5, 6)</sup>。酸化チタン等光触媒は、強い酸化分解力を持

図表1 光触媒酸化チタン表面で起こる2つ現象



(科学技術動向研究センター作成)

図表2 光触媒システムと可能な応用領域



(科学技術動向研究センター作成)

ち、分解対象物質を選ばず、有機塩素化合物でも炭酸ガスと塩酸にまで完全分解できる。2次汚染の心配も無い。現在では光触媒は光

を利用するだけで、分解されにくい種類の化学物質を安全かつ容易に無害化することができる環境にやさしい環境浄化材料として脚光

を浴びている。

酸化チタンなど光触媒に光を当てると、その表面では、図表1に示すように2種類の反応が起こる。ひとつは以上のような強い酸化分解力によって物質を分解してしまう反応（光触媒分解反応）であり、他の1つは、水の濡れ性が向上し、表面が親水性となる（光親水化反応）<sup>7)</sup>。光触媒の親水性について研究は最近富に盛んになっており<sup>8)</sup>、その実用化の進展も最近目覚ましいものがある。

以上の光触媒技術的進歩によ

り、産業廃棄物の無害化処理、空気の浄化、地下水・湖の水の浄、汚れ分解、流出原油処理、食品保鮮、抗菌、抗カビ、曇り・ぬめりの防止など、快適な生活を作り出すための、陰の立役者となりつつある（図表2）。さらに最近、環境ホルモ等内分泌かく乱物質、アレルギー性物質など大気中の微量有害物質の分解除去も研究されている。

光触媒の研究がもっとも盛んな国でもあるわが国としては、おのおの光触媒材料の可能性と限界、長所と短所、各触媒材料の詳

細な表面構造、活性サイトと触媒の選択性などの精査といった基礎研究面、その長所を余すことなく活用する応用面、そして誰もが安心して使える材料となるような品質の保証・管理面などを世界にさががけて提案し、世界の光触媒の研究開発におけるリーダーとしての役割をはたす責務がある。

以上の観点から、光触媒の研究・開発の現状と将来像について、簡単に解説する。

## 2. 触媒のしくみ

### 光触媒反応の作用機構

光触媒としては金属イオンや金属錯体なども用いられるが、最もよく使用されているのは半導体である。とりわけ、酸化チタン、酸化亜鉛、酸化タンゲステン、酸化鉄、チタン酸ストロンチウム、硫

化カドミウム等の氧化物半導体がその中心物質として利用されている。

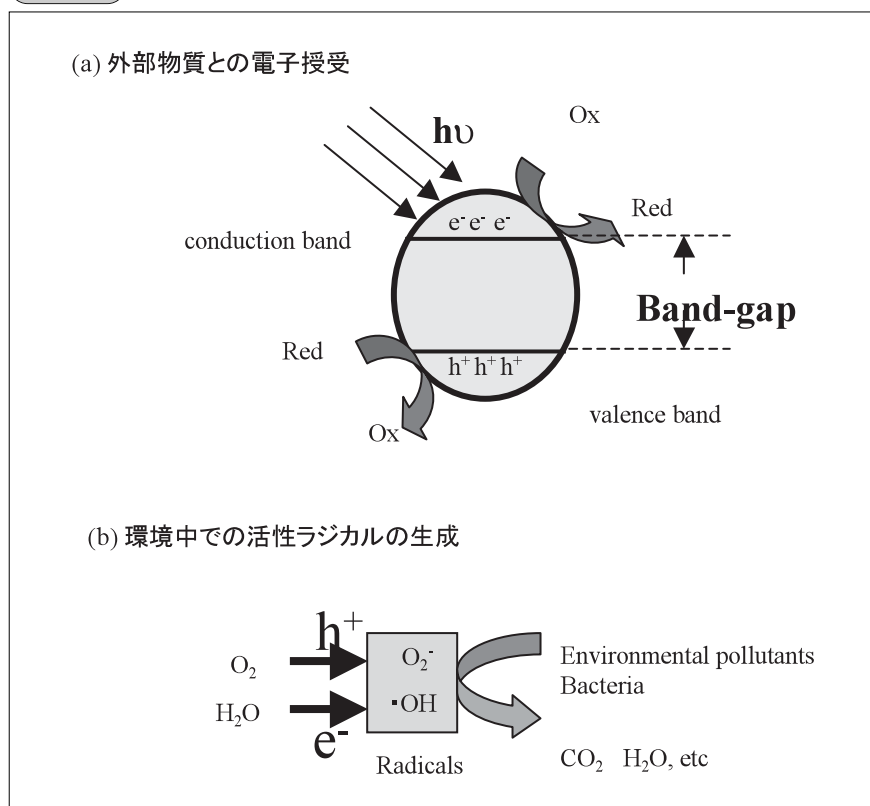
半導体は文字の通り電気伝導率が金属と絶縁体の中間にある。すなわち、通常、電気を通さない不導体であるものが、光、熱、電場など外部の刺激を受けて電気を通すようになる。光励起による導電性の獲得には、どんな光でもよい

わけではなく、ある波長以下光（すなわち、ある波長以上のフォトンエネルギー）であることが必要である。このエネルギーをバンドギャップエネルギーといい、それぞれの半導体物質、特有の値となっている<sup>9)</sup>。

光触媒反応は、光触媒の表面に反応物質と作用して起こす反応である。バンドギャップ以上のエネルギーを持つ光を半導体に照射した際、半導体が外界と接している状況を化学の目で見ると、図表3(a)のようになる。通常価電子帯にある電子が光のエネルギーを受けて伝導帯に上がって、電子（ $e^-$ ）と正孔（ $h^+$ ）という2つの電荷キャリアを生じる。これらのキャリアは、半導体の表面に拡散し、外部の物質に移行する場合がある。外部の物質が電子を受け取るとその物質は還元されたという。また、正孔と反応して外部の物質が電子を失うとその物質は酸化されたという。従って、光触媒は、光照射によって、酸化・還元の一両反応を引き起こす物質ということになる。

光触媒を環境中で使う場合は、図表3(b)に示すように、豊富に存在する酸素や水が優先的に電子や正孔と反応し、スーパーオキシド

図表3 光照射下の半導体光触媒



(科学技術動向研究センター作成)

イオン ( $\cdot O_2^-$ ) やヒドロキシル ( $\cdot OH$ ) ラジカルが生成する。活性酸素種と総称されるこれらは塩素やオゾン以上の酸化力を持ち、多くの物質を酸化的に分解する。光触媒は多くの機能を有するが、その大部分はこの活性酸素種の生成能力に由来している。

## 光触媒反応の特徴

光触媒の応用の観点からその特徴を挙げると、以下の点になる。

### ①微量の反応物分解に特に有効である。

光触媒表面には、タバコのヤニから大腸菌まで、実にさまざまなものを分解できることが確かめられている。光触媒という名の通り、この分解反応は、光のエネルギーを利用して起こる反応である。当然の事ながら、分解の対象物が光触媒の表面に接触し、光がないと効果が現れない。このことは、光触媒反応を理解し、応用を考える際、最も大事なポイントとなっている。光触媒のこの特徴から、光触媒は一度に大量の物質を分解することには不向きである。少量の対象物質が徐々に増えてくるようなものに対しては、大きな効果がある。例えば、図表4のように、光触媒タイルに少量の汚れがある場合と、大量の汚れがある場合を想定した場合を考える。前者の場合は効果が多

きい。これに対して、汚れが多い場合、光触媒タイル表面のすべては覆われるため、光がタイルの表面に届かず、除汚の効果は期待できない。昨今話題になることが多い悪臭物質や環境ホルモンなど有害物質では、ごく微量で人体や環境に影響を及ぼすことから、光触媒利用の格好のターゲットになっている。

### ②似高温効果、即ち、室温で物を燃焼させるのと同じ効果がある。

先述したように酸化チタン光触媒が紫外線を吸収すると、先に述べたようにその表面（図表1）で二つの現象が起こる。一つは光触媒分解である。これは物質を分解してしまう現象であり、最終的には、有機物は二酸化炭素と水に分解される。これは光合成反応の逆反応、すなわち燃焼反応に相当する。酸化チタンが波長 380 nm 以下の紫外線励起と同様の効果を熱エネルギーで得ようとした場合、3万度以上の温度を要する。しかし、通常の燃焼反応とはまったく異なり、光触媒反応では温度が上昇せずに、室温の状態での反応が進行する。また、燃焼反応では、いったん火がつくと物質が無くなるまで反応が継続するが、光触媒反応では、光が照射され、吸収した光の量の分だけ反応が進行する。従って、光触媒反応は燃焼反応よりコントロールしやすいという点も特長の一つとして挙げられる。

## なぜ酸化チタンなのか

先に述べたように、光触媒機能を持っている半導体は数多く知られている。しかし、現在市販されている光触媒製品では、ほとんどすべての場合、光触媒として二酸化チタンが使われている。その理由は、以下の四点に要約される。

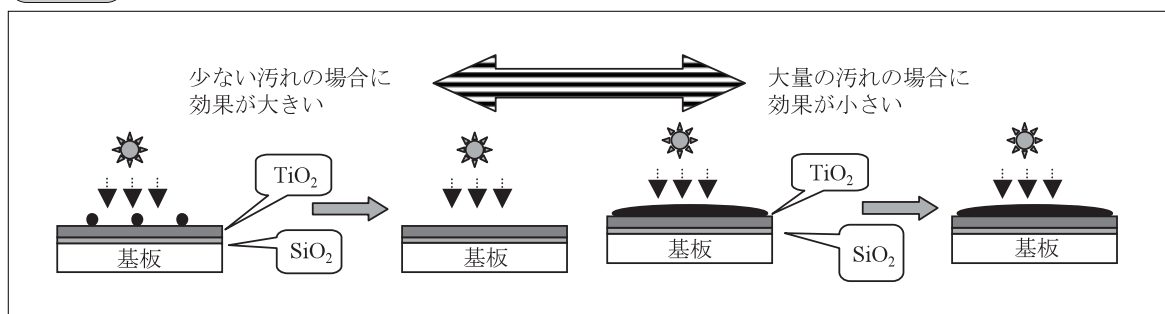
### ①物理的・化学的に極めて安定である。

太陽光を構成する光の主たる部分は可視光である。光触媒反応の効率を上げるためには、バンドギャップのもっと小さな半導体を使って可視光を利用することが望ましいと考えられる。しかし、酸化チタンよりバンドギャップが小さな材料では、例えば、硫化カドミウム、セレン化カドミウムなど、水の中で光を当てると、自己溶解現象を起こす。これは、光照射によって発生した正孔が自身を酸化することで、金属イオンが溶け出し、してしまうことによる現象である。多くの半導体は、このような現象が起こるため、耐久性がなく、実用材料としての使用を困難にしている。一方、酸化チタンでは、このような自己溶解現象が起きないため、安定性の点で他の半導体より優れていると言える。

### ②光触媒活性が高い。

酸化チタンの光触媒活性は酸

図表4 光触媒の限界（多量物質の処理に不向き）



（科学技術動向研究センター作成）

化チタンの結晶構造に強く依存している。酸化チタンには、アナターゼ、ルチル、ブルッカイトの3種類の結晶構造がある事が知られているが、光活性の点からはアナターゼ構造のものの活性が高いことが知られている。そのため、光触媒反応においては、アナターゼ型の酸化チタンが有効であると考えられている。

### ③無害無毒で環境にやさしい。

白色顔料や食品添加剤としても安全性が確認されており、環境や人体に対する影響がほとんど無い。

### ④原材料が廉価である。

チタン自体は、地球の地殻に存在する元素の中でも9番目に多く、資源的に大変豊富な金属である。原料の鉱石としては、鉄とチタンの酸化物であるイルメナイト鉱か、ルチル鉱があり、いずれの鉱石からも酸化チタンが生産されている。製造のProcess（塩素法と硫酸法）も比較的簡単で、低コスト化が可能な材料である。

以上の特長から見ると、酸化チタンは環境中で大量に使用できる条件が揃っている。一方、安定性だけから検討すると、酸化チタンに匹敵する光触媒活性を持つ材料としては、チタン酸ストロンチウムや層状のニオブ酸カリウムが見出されているが、製造プロセスが煩雑でコスト面に難がある上、環境に放出された際の悪影響も懸念される。有機物を分解する能力、コスト面から見ると、酸化亜鉛も有望であるが、先に述べたように光溶解する欠点があり、この克服が課題となっている。

また酸化チタンでは、そのバンドギャップ（3.2 eV）であるため、紫外光しか吸収せず、光の有効利用の観点から、この克服のために多くの研究がなされている。

## 光源について

上記の作用機構から判るように、「光触媒、水と酸素、光源」この三つが光触媒反応を起こす必要三大条件と言える。ここでは最後の光源について考えてみたい。

自然界にあって我々が容易に利用できる光源は太陽光である。太陽から地上に届く光には290 nmから4,000 nmの波長の光が含まれている。このうち、400 nmまでは紫外線、400 nmから800 nmまでは順に紫、青、緑、黄色、赤といった可視光線、800 nm以上は赤外線である。太陽光は可視光域の450 nm付近で最大強度を示す。地球表面に1年の間に到達している光のエネルギーは $3.0 \times 10^{24}$  J/年であり、人類が現在1年間に使っている石油や石炭などのエネルギーの1万倍以上である。このうち、紫外線が約4～5%、可視光線が45%、赤外線が約50%となっている。

現在、光触媒として実用化されているのはほとんど酸化チタン光触媒であるため、光触媒反応に使用される光は紫外線ということになる。上記したように太陽光の紫外線の強度は大きくないため、人工的な紫外線光源の使用が、現段階での現実的な選択となっている。通常、水銀ランプ、キセノンランプ、ブラックライト、ケミカルライト光源がよく用いられている。しかし、これらの光源は、寿命が数千時間程度であるため、連続使用の場合には半年程度で交換が必要で、利用範囲が限られていた。また、通常の紫外線ランプは電気が光に変換される効率がせいぜい20%で、残りは無駄に熱に変換してしまう。したがって、現在使われる紫外線光源はコストの観点からみると、予想以上に高価な点が大きな問題となっていた。

図表5

文献調査にみる2,000年から現在までの光触媒性を研究対象とした物質の動向

Materials	Number	%
TiO <sub>2</sub>	617	78
ZnO	35	4
WO <sub>3</sub>	22	3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14	2
ZrO <sub>2</sub>	12	2
SrTiO <sub>3</sub>	4	1
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4	1
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3	0
CeO <sub>2</sub>	3	0
Others (including organometallic complex)	76	10
Total	790	100

(科学技術動向研究センター作成)

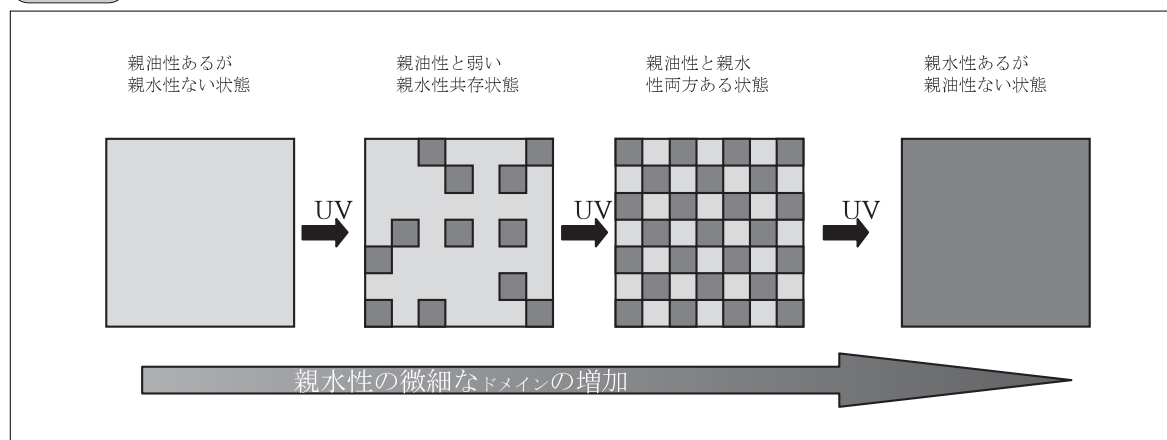
この困難をブレイクスルーする光源として、もう一種類の発光ダイオード（LED）が考えられている。発光ダイオードは寿命が約10万時間と大変長く、消費電力の80%以上が光に変換され、電気→光変換効率が高く、低消費電力であるため、蛍光灯に代わる将来の光源として期待されている。最近、窒化ガリウムベースの短波長LEDが開発され、それを用いた車載用空気清浄機が世界で初めて我が国で実用化された<sup>10)</sup>。今後、低コストの短波長発光ダイオードの開発が、光触媒の広範な応用に対してカギになると考えられている。

## 光触媒の可視光化方法

水の分解による酸素と水素の製造、あるいは環境汚染物質の無害化過程に用いる光触媒が利用できる光は紫外線に限られてきた。しかし、そもそも紫外光は人体に有害であるため通常環境で強度の強い光を使うことは懸念される。また、太陽光の様な自然光あるいは室内照明光を利用することも、効率向上の為に必要とされている。そのため、可視光で動作する光触



図表6 光照射に伴う酸化チタン光触媒表面の構造変化モデル



(科学技術動向研究センター作成)

媒の開発が、現在、この分野において最大の研究目標の一つとなっている。方法としては、次の五つほどが提案されている。すなわち、①遷移金属のドーピング<sup>11)</sup>、②水素プラズマ処理<sup>12)</sup>、③色素増感作用<sup>13)</sup>、④可視光を吸収できる半導体の複合化<sup>14)</sup>、⑤酸素の代わりに窒素を置換する<sup>15, 16)</sup> 等である。方法①は金属イオンを注入するため高価な設備が必要となる。方法②には、可視光を吸収する原因が水素プラズマ処理により生じる酸素欠陥であるため、触媒活性の継続性と再現性については十分に検討する必要がある。③色素増感の方法は、光触媒への応用には、必ずしも適当ではない。なぜならば、色素の光励起では、酸化力は色素に生じるため、強い酸化力が期待できないからである。④半導体の複合化と⑤窒素のドーピングは最も期待できる方法と考えられている。現在この二つの方法を中心に光触媒の可視光化についての研究が盛んで、今後、大きな進展が期待される。

### 光触媒の親水性

酸化チタン光触媒が紫外線を吸収すると、その表面(図表1)で二つの現象が起こる。一つは光触媒分解現象で、もう一つは光親水現象であることは既に述べた。な

ぜ光触媒表面は、光照射により光触媒、水に対する濡れ性が非常に高い状態にいたるのか？ これまでに光触媒の持つ強い酸化力を利用した光触媒反応を概観してきた。光親水性もこれと同様に、強い酸化力による表面に付着有機物の酸化分解除去により生まれている、という考え方がある。しかし、最近、表面構造の研究が進展し、光照射による親水性の実現は酸化チタン表面自身の構造変化に起因していると考えられるようになってきた。図表6には光触媒表面構造の変化モデルを示した。光照射前の酸化チタン表面は、一様に疎水性であるが、光照射に伴って親水性の微小領域(ドメイン)が形成され、最終的には一様に親水性の表面になる。親水性の高いドメインの形成機構については現在まだまだ検討段階であるが、さまざまな実験結果から総合的に考えると、光照射により生じた正孔が酸化チタンの酸素に酸化され、その結果、酸素欠陥が生じ、ここに水が吸着し、親水性のドメインが形成される、という考え方が有力である<sup>17)</sup>。

光触媒のいろいろな機能に光触媒の親水性を加えて、光により水との親和性がたかまる、光超親水性(液体との接触角が0度になる性質、現象)などの新しい機能の発見により、曇らない鏡や窓拭き

の必要のない高層ビルの窓(セルフクリーニング効果)の開発、超撥水性(液体との接触角が150度以上になる性質、現象)を持つアルミナなどとの組み合わせによる、雪国における電線への積雪防止機能や、雪下ろしの労力を低減させる屋根の検討など、新たな市場を呼び起こすことが期待される性質も見つかっている。

### 光触媒作用による水の分解

よく知られているように、環境面に優しいエネルギー源として水素が着目されている。しかし、どのような方法で水素を得るかということが、現実的な問題として残されている。水素を得る一つの方法として、光触媒作用を利用して水を分解することが考えられている。これは、そもそも光触媒が世に着目された原点でもあり、材料探索を含めての基礎的な研究が、現在においてもなされている。しかしながら、未だ酸化チタンを凌駕する材料の発見には至っていない。酸化チタン系においても水分解に利用しようとした場合、その量子効率の低いことが問題である。現在、1%以下といわれており、光を電気エネルギーに転換する太陽電池の効率と比較して、著しく低いのが現状である。当面の目標としては10%が設定されて

いるが、600nm以下の可視光領域で30%に達すれば、水素源の問題は一挙に解決しうる。水分解では、さらに、他の光触媒応用同様、可視光応答の問題も残っている。

## 光触媒性能評価法

反応評価法には、色素分解法、蛍光法や反応生成物を分析する方法等、多様な用途に応じて多くの方法が研究者から提案されている。反応生成物を分析する方法では、実際に触媒反応を行い、反応物と生成物をガスクロマトグラフや高速液体クロマトグラフ等を用いて分析することが一般的である。反応装置は、光触媒が薄膜や

板状か（固定型）あるいは粉末かにより、また、反応媒体が気体か液体かにより、大まかに次のように分類される。

(1)固定型光触媒—気相系：密閉系あるいは流通系の反応セルに、反応対象物質を含む気体（多くの場合は空気）と光触媒を入れ、光照射し反応させる。(2)固定型光触媒—液相系：基本的に気相系と同じである。水の浄化を目指す場合には、光触媒の分離の必要がないため有利である。粉末状の触媒を用いた(3)粉末状光触媒—気相系および(4)粉末状光触媒—液相系も用いられる。

光触媒製品技術協議会では、光触媒性能評価試験法と光触媒性能

基準を公表している (<http://www.photocatalysis.com>)。このうち、光触媒性能評価試験法Ⅰ（液相フィルム密着法）は、平板状の光触媒製品の光触媒性能に関するものであり、光触媒性能評価試験法Ⅱa（ガスバックA法）は、粉末や粒状など種々の形状の光触媒製品の光触媒性能に関するもの、光触媒性能評価試験法Ⅱb（ガスバックB法）は吸着の大きな光触媒製品の光触媒性能に関するものである。しかしながら、本稿で述べるような様々な用途に対応するものとはなっておらず、標準化としては不十分な状態にある。

## 3. 光触媒の具体例

前述のように、光触媒の本格的な研究は1970年代からはじまっており、この進展に伴い様々な光触媒に関する新材料が開発された。他の研究分野に比べると、光触媒研究領域の一つ特徴は、基礎から応用にいたる道筋の距離が大変短く、新材料の開発がすぐに製品に反映される点にある。また、新材料の開発に伴い、さらに新しい応用も開け、製品化が加速され

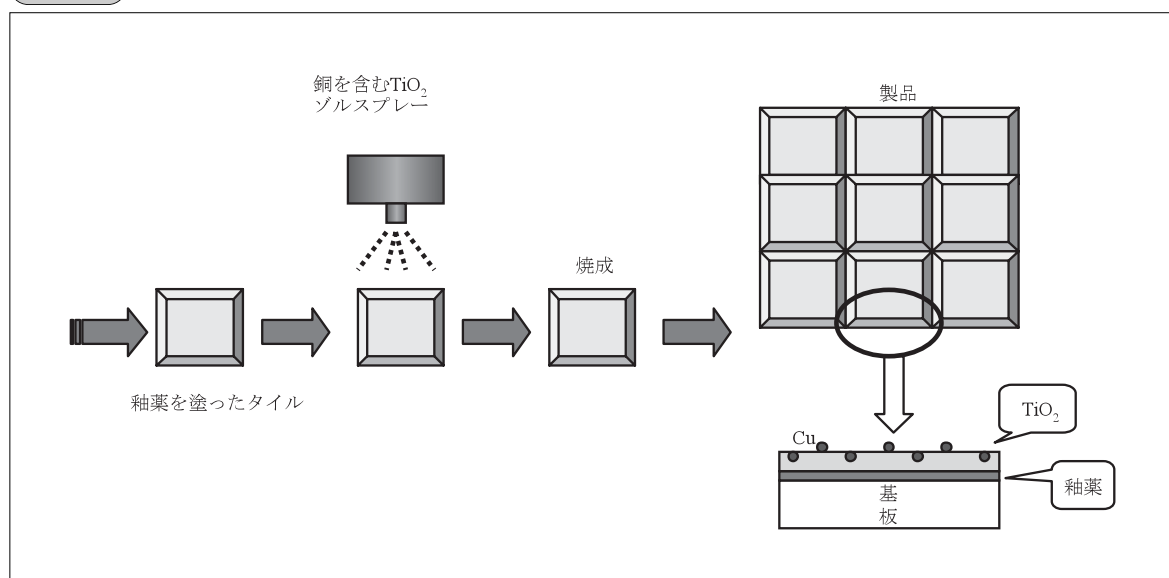
る状況にある。光触媒製品は、子供から老人まで誰でも接する機会があり、簡単且つ安全に使用することができるような応用分野が期待され、光があればどこでも使用可能である。特にエネルギー不足の開発途上国に最適の技術である。そのため、これまで多くの企業や研究機関のいろいろな創意工夫によりさまざまな光触媒製品が生み出されてきた。ここに、実用

化された主な製品を紹介する。

### 【実例1】 抗菌、防汚光触媒タイル

光触媒タイルは、最も早く（1994年）実用化された光触媒機能を有する製品である。このような光触媒タイルは、元来、医療用途に開発されたものである。抗生物質が効かない院内感染の原因と

図表7 光触媒タイルの製造プロセス



（科学技術動向研究センター作成）



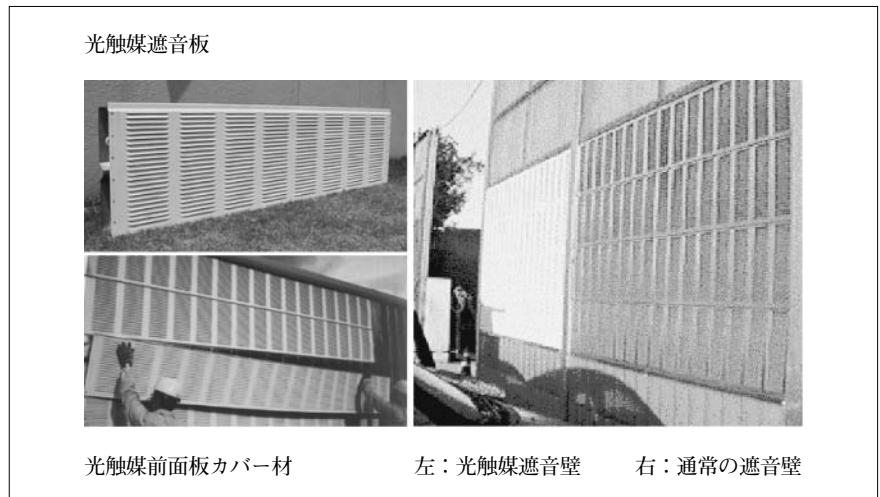
なるMRSA（メチシリン耐性黄色ブドウ球菌）などにも効果が高いことが判明したため、病院の手術室等に盛んに利用されている。そして、現在では、このような医療用途の高い性能を有する光触媒タイルが、一般の住宅等で用いられるようになってきた。お風呂やキッチンなどの水周りのような常に微生物が繁殖しやすく、汚れが発生しやすいところが最適な応用箇所である。光触媒タイルの製造プロセスを図表7で示す。ここで強調したいことは、暗い場所でも抗菌効果を発揮するため、もともと自身に抗菌性がある銅金属を酸化チタン表面に固定することで、複合的な効果を付与している点である。

## 実例2

### 光触媒大気浄化吸音板

高速道路の沿道の両側に設置された遮音壁の色が、以前の暗い灰色から白色の新しいものに代わってきている。これは光触媒吸音板を既設遮音壁へ取り付け、大気浄化の効果を持たせた結果である。この光触媒大気浄化吸音板は、自

図表8 光触媒大気浄化遮音板と高速道路遮音壁



(引用文献 左側の写真2つ<sup>18)</sup>、右側の写真<sup>19)</sup>)

動車から排出したNO<sub>x</sub>を無害な硝酸イオンまで完全酸化させることができる。有害な中間体をほとんど出すことがない。また、このような吸音板は防汚機能も持っており、自身のセルフクリーニングにより、きれいな外観を長期間維持することができる。これは、自然のエネルギーだけで働く大気浄化システムの最適の代表例と言える。図表8は光触媒大気浄化吸音板が設置されている道路の写真である<sup>18, 19)</sup>。現在、これらの光触媒大気浄化吸音板は、全国で約

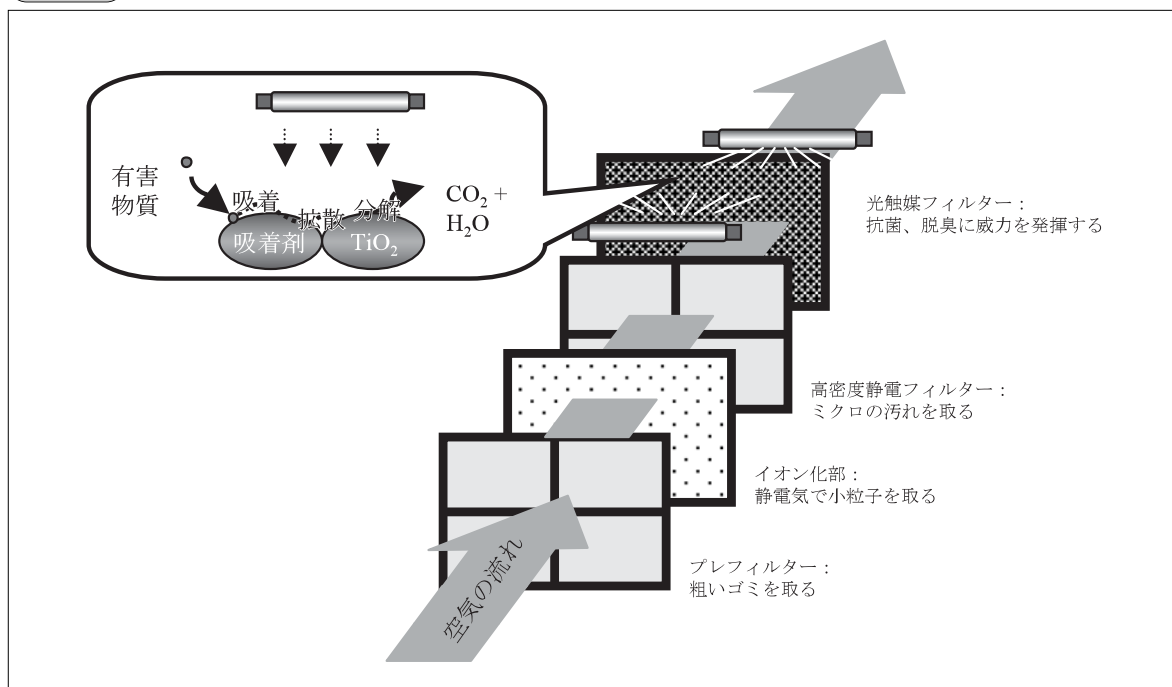
4,000 m<sup>2</sup>の設置実績がある。この光触媒大気浄化吸音板の成功をきっかけに、大気浄化機能付き、路面舗装用光触媒材料—コンクリートブロックの実証実験が進められている。道路資材分野での光触媒技術の応用はまだ始まったばかりであり、今後、多くの実用化製品が誕生すると考えられる。

## 実例3

### 脱臭、抗菌空気清浄機用フィルター

最近、冷暖房の効率向上や省エ

図表9 光触媒フィルター付き空気清浄機のしくみ



(科学技術動向研究センター作成)

エネルギーのため、住宅の高気密化、高断熱化が進んでいる。これにつれて、生活環境での有害物質と細菌による汚染が問題になっている。シックハウス症候群、あるいは新築住宅病という言葉は、新聞やテレビ等によく取り上げられるようになった。建築材料や塗装剤から揮発する揮発性有機化合物（ホルムアルデヒド、トルエン等）、がその原因であるとされている。また、厨房調理臭や生ゴミ臭、タバコ臭、トイレ臭等種々の臭いは人間の気持ちだけを悪くするだけではなく、室内に長時間とどまり、人体に悪影響を及ぼす。これらの微量の有害物質を分解・除去するため、光触媒機能付きの空気清浄機が重要な役割を果たしている。図表9は酸化チタンを用いた空気清浄機気のフィルターのしくみを示す。これらは、活性炭などの吸着剤とハイブリッド化し空気清浄機の効率を向上させた点がポイントである。空気中の有害物質分子を酸化チタンのみでは効率的に吸着することができない。それゆえ、吸着剤等との組み合わせは必須となっている。これらの有害物質は、まず吸着剤に捕らえられ、ここか

ら酸化チタン表面に拡散して分解される。また、空気中の浮遊細菌やウイルスは光触媒フィルター上では生存できないので、抗菌、抗ウイルスの効果も期待できる。

脱臭は光触媒の応用分野の中で最も適用しやすく、製品化がかなり進んでいる。すなわち、抗菌性を持たせた、脱臭空気清浄機、エアコン、冷蔵庫などの多くの製品が既に販売されている。

#### 実例4 防曇ガラス

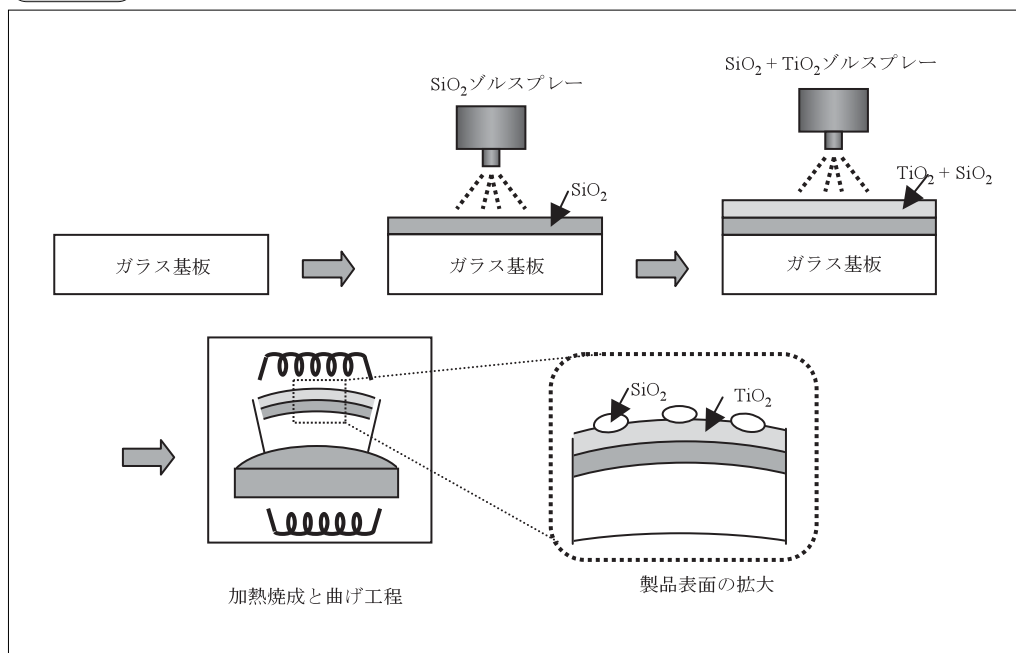
雨の日に車の運転で気になるのは、フロントガラスやサイドミラーに付着した水滴である。特に夜間は、サイドミラーの水滴にヘッドライトが反射して、視界が大変悪くなる。酸化チタンの表面は、日中太陽光に含まれるわずかな紫外線が当たるだけで表面が高度の親水性となり、この効果によって水滴の形成を防止することができる。しかし、自動車サイドミラーの水滴防止に応用しようとする際、日中は効果が期待できても、日没後又は暗い場所に、親水性を長時間維持するのは問題となり、

従って、実用化するため、技術の複合化が不可欠である。

この問題は、シリカを添加することによって劇的に解決された。シリカは、その表面に水分子を大変吸着すること知られている。酸化チタンの光励起反応で、シリカ表面がクリーニングされ、ここに水分子が強く吸着されることで、暗い場所においても、親水性が維持されるのだと考えられている。この技術で、自動車サイドミラーを実用化が可能になってきた。自動車サイドミラーの製造プロセスは図表10で示す。中間層シリカの導入はガラスの中のナトリウムイオンが光触媒酸化チタン層への拡散を防止するという目的で導入されている。現在、光触媒自動車用品は、自動車サイドミラー製品だけでなく、既存の自動車サイドミラーに粘着材で貼り付けるタイプの光触媒フィルムも市販されるようになった。

以上、四つ光触媒応用実例とそのしくみ、製造などを簡単に述べた。光触媒の利用分野は、当初、ホンダ・フジシマ効果として水から水素を製造する技術として期待

図表10 光触媒自動車サイドミラーの製造プロセス



(科学技術動向研究センター作成)

された。その後、空気処理と水処理へと展開し、さらに薄膜コーティングが考案されるようになってから、建材分野や自動車分野等、

一挙に応用が広がっている。今後、光触媒材料技術の進歩とともに、新しい分野への応用が期待できる。近い将来、私たち身の周りの

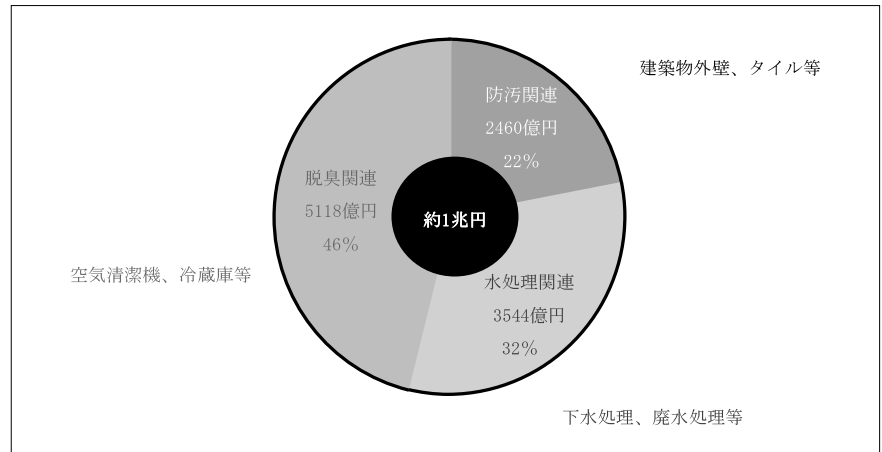
ほとんどすべてに光触媒技術が取り込まれ、その多様な恩恵を受けることは夢ではない。

## 4. 光触媒が生み出す市場

近年、地球規模で環境汚染が進み、環境問題は人類生存を脅かす最重要課題となっている。光触媒は処理後に余計な有害物質を出さず安全で、大気や水の浄化はもちろんのこと、シックハウス対策や、脱臭、防汚、抗菌など、環境分野での幅広い応用が可能であるため、環境の世紀と言われている21世紀における期待の技術となっている。現在、高機能光触媒の開発、実用化が急速に進み、市場参入の関連企業は3,000社前後に上ると推定されている。

光触媒市場は現在のところ、400億円と推定されているが、1999年11月24日に発表された三菱総合研究所の調査報告では、2005年に1兆円を超えると予想されていた(図表11)<sup>20)</sup>。そのうち、空気清浄機や冷蔵庫などの脱臭関

図表11 2005年の光触媒市場規模予測

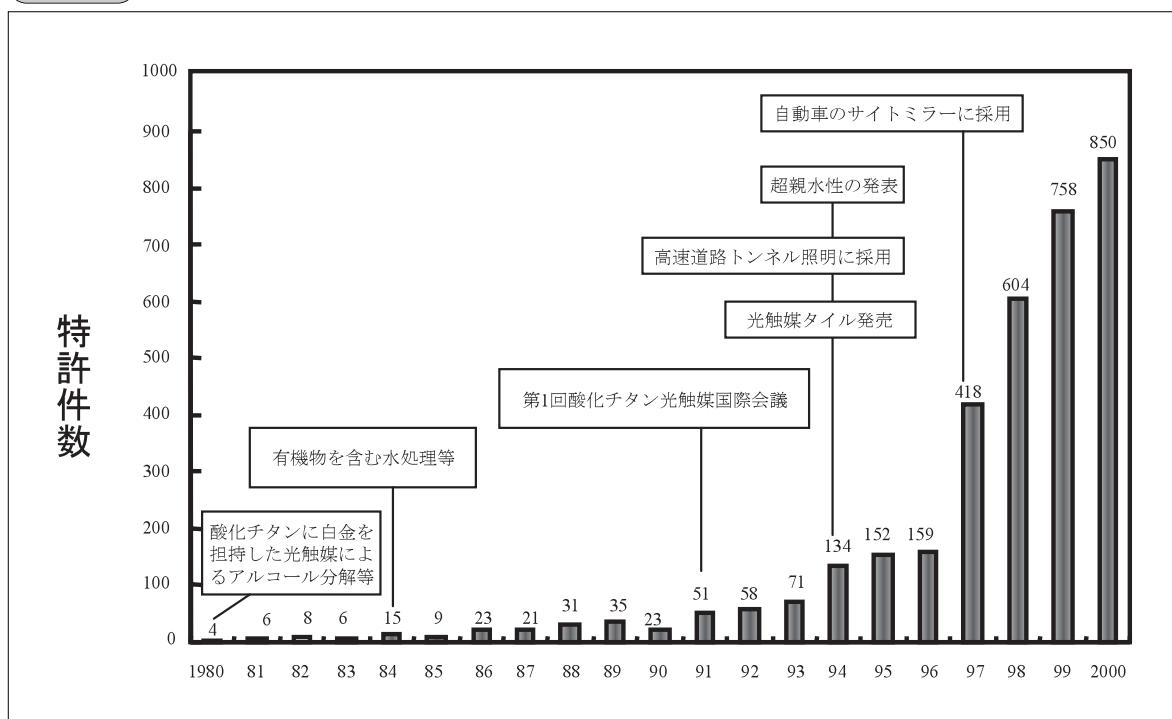


(三菱総合研究所の報告をもとに科学技術動向研究センター作成)

連が5,118億円、下水や廃水などの水処理関連が3,544億円、外壁やタイルなどの汚れ防止が2,460億円、合計1兆1,122億円に達すると試算されている。さらに環境産業は2010年に37兆円になると予想されており、光触媒産業は環

境産業の中核とみなされ、発展が期待されている。実際のマーケットの広がりや、期待された伸びを示していないことも事実である。この原因は、技術的な側面と言うよりも触媒のコストの面にあったとされている(文献<sup>20)</sup>、「光触媒

図表12 光触媒の出願特許数の推移



(引用文献<sup>21)</sup>)

の世界」p.124)。コスト面での問題は、その詳細はつまびらかではないにしろ、最近クリアされてきているようで、急速な拡大を示している。

また、試算されない分野にも、材料技術の進歩とともに、実用化して市場に出てくる可能性がある。例えば、農業分野において、果実や野菜などの腐敗を進めるエチレングスを光触媒で分解・除去できることを利用して、果実や野菜などの農産物の保管庫に用いられる。食品製造分野において、工

場のバクテリアの制御問題が常に重要な課題である。ここでも、光触媒の利用が期待できる。特に、殺菌剤の多用によって耐性菌が発生してしまったケースでは、光触媒のバクテリアの種類を選ばない殺菌力は、大変重要な機能として注目されている。今後、光触媒研究の進展に伴い新しい応用分野が展開する、と考えられる。

光触媒の研究がもっとも盛んな国でもあるわが国は、世界の光触媒の研究開発におけるリーダーとしての役割を果たしている。特許

庁によると、1980年から2000年の過去20年間に、光触媒に関する特許は、日本の出願が約2860件（図表12）で、米国の特許登録件数（409件）、欧州の同出願件数（390件）を大きく上回っている<sup>21)</sup>。世界的に見ても日本の特許出願は最も活発で、全世界の特許出願の90%を占めている。特許の面から日本の光触媒技術は高い国際競争力を持つと判断される。すなわち、長く低迷をつづけるわが国経済にも、希望の光を投ずる可能性もある。

## 5. まとめ

地球環境にやさしい新技術として、注目される光触媒は、急速な市場の拡大を背景に、我々の日常生活空間で利用され始めている。

今後は、単一の光触媒の可能性を最大化する検討とともに、それぞれの短所を補いつつ長所を助長するマルチフォトキャタリストシステムや、光触媒機能をまったく異分野の技術と融合させるトランスフォアエンジニアリングの視点にたつ新しいシステム開発が行われると期待されている。

現実的な問題としては、光触媒開発ブームから、海外からの、安価ではあるが、性能が目的に添わない製品が流入していることもあり、JIS化やISOにおける標準化・規格化も不可欠な課題であり、今後、取り組んでいく必要がある。

酸化チタンを中心とした応用面での開発は産業面においても現在大いに進んでいる。しかしながら、本現象を利用する応用は他の技術の補完的な立場から脱却するものとは言えない。本質的にクリーンな技術であるため、何らかのブレークスルーが実現すれば、その貢献は計り知れない。基本的には光触媒の研究開発における問題点は二つに分類される。

一点は量子効率の低さである。この点欠点を克服するには、光触媒機構の基本的な解明、さらに、酸化チタンの量子効率より高い効率を持つ材料の探索にある。先に述べたように酸化チタンのコストの高さが、実用化を妨げている面がある。例えば、光溶解の問題が解決されれば、酸化チタンより更に安価な酸化亜鉛を用いることができ、市場拡大のブレークスルーになることは間違いない。しかしながら、これらの基盤的な面での研究・開発は、酸化チタンを基本材料として実用化を目指している産業界では困難であり、そのために光触媒が広く利用されることを妨げている。

もう一点として、可視光応答の材料開発にある。この分野では、可視光を吸収させるために、窒素や遷移金属が添加されていることは既に述べたが、材料探索としては端緒についたところであり、不十分な状態にある。基本的な材料を確保できるか否かによって、ポストチタニアの時代になった際、この分野のイニシアティブの行方が左右される。しかしながら、この方面の探索も多大なリスクを伴うため、当面の利益を確保することが至上命題である産業界にとっ

ては、難しいのが現状である。

水の光分解は、実用化の見通しが全く立っていない分野であるが、機構的な解明が困難な現状では、探索指針を提示できないというのが現状である。この意味においても、基礎的な研究を早急に進展させることが、不可欠になっている。

以上述べたように、日本がリードしている光触媒における現在の地位を確保し、さらに発展させるに当たっては、産業界だけの努力だけでは困難な点が多く、政策的な面から研究・開発をバックアップしていく必要がある。とりわけ光触媒機構の解明は材料探索の基礎となるものであり、理論面を含めた物理・化学を広範に組織し、対応していく必要がある。過去、我が国は産業界においても材料探索が精力的になされてきたが、現在、一私企業ではその本業とする分野においての材料探索も経済的に困難な状況にある。本質的に次世代材料と位置付けられる材料の探索は、国家的な見地からなされることが不可欠である。また、現在主流の酸化チタンの利用は、現在のところ他国の追随を許してはいないが、すでに四半世紀を経た材料であることを考慮すると、次

世代材料としてこれを越えた材料開発を我が国でなすことが、新産業を定着させるに当たっても不可欠な条件であると考えられる。現象の基礎的な解明・材料探索は、広範な公的組織で対応することが最も効率的であり、早急に対応していく必要が有る。

基礎から応用までの幅広い研究開発に加えて、こうした標準化・規格化に性能の保証を行うことではじめて、光触媒は真にわれわれ生活者を含めた地球に生活するすべての動植物にやさしい新技術へと発展していくもの、と期待される。

## 文 献

- 1) N. Serpone and A.V. Emeline, International J. of Photoenergy 4 (2002) 91.
- 2) 埴田博史、「光触媒の本」、日刊工業新聞社、2002.
- 3) M.C. Markham et al., J. Phys. Chem. 66 (1962) 932.
- 4) A. Fujishima and K. Honda, Nature 238 (1972) 37.
- 5) M.R. Hoffman et al., Chem. Rev. 95 (1995) 69.
- 6) J. Peral et al., J. Chem. Technol. Biotechnol. 70 (1997) 117.
- 7) 藤島 昭、橋本和仁、渡部俊也、「光触媒のしくみ」、日本実業出版.
- 8) 撥水性・親ガラスの製造と応用、TIC特許シリーズ, No. 1019 (1999) .
- 9) 窪川裕、本多健一、斉藤泰和、「光触媒」、朝倉書店、p53.
- 10) 特開2002-270892：窒化ガリウム系化合物半導体発光素子、豊田合成株式会社
- 11) M. Anpo, Pure Appl. Chem. 72 (2000) 1265
- 12) I. Nakamura et al., J. Mol. Catal. A: Chem. 161 (2000) 205.
- 13) A.L. Linsebigler et al., Chem. Rev. 95 (1995) 735.
- 14) K.R. Gopidas et al., J. Phys. Chem. 94 (1990) 6435.
- 15) T. Takada et al., Catalysts & Catalysis (Japan) 43 (6) (2001) 499.
- 16) R.Asahi et al, Science 293 (2001) 269.
- 17) R. Sun, A. Nakajima, A. Fujishima, T. Watanabe and K. Hashimoto, J. Phys. Chem. B 105 (2001) 1984-1990.
- 18) 積水樹脂株式会社、光触媒吸音板, <http://www.sekisuijushi.co.jp>
- 19) 千葉県環境研究センター大気部、光触媒に関する調査研、<http://www.wit.pref.chiba.jp>
- 20) 竹内浩士、村澤貞夫、指宿堯嗣、「光触媒の世界」、p.128、工業調査会 (2001) あるいは、埴田博著、「光触媒の本」、p.139、日刊工業新聞社 (2002) .
- 21) 特許庁編、特許マップシリーズ 化学23「光触媒とその応用」、発明協会 (2001)。

.....

---

# SCIENCE & TECHNOLOGY TRENDS

**December 2002**  
(NO.21)

## Science & Technology Foresight Center

National Institute of Science and  
Technology Policy (NISTEP)  
Ministry of Education, Culture, Sports,  
Science and Technology

※このレポートについてのご意見、お問い合わせは、下記のメールアドレスまたは電話番号までお願いいたします

なお、科学技術動向のバックナンバーは、下記の URL にアクセスいただき「報告書一覧 科学技術動向・月報」でご覧いただけます。

## 文部科学省科学技術政策研究所 科学技術動向研究センター

---

連絡先：〒100-0013 東京都千代田区霞が関1-3-2  
電話 03-3581-0605 FAX 03-3503-3996  
URL <http://www.nistep.go.jp>  
Email [stfc@nistep.go.jp](mailto:stfc@nistep.go.jp)





- ▶ Life Sciences
- ▶ Information & Communication Technologies
- ▶ Environmental Sciences
- ▶ Nanotechnology & Materials
- ▶ Energy
- ▶ Manufacturing Technology
- ▶ Infrastructure
- ▶ Frontier

Science & Technology Trends

科学技術動向

《2002年12月号》

文部科学省 科学技術政策研究所  
科学技術動向研究センター